GEOSTAB 2013

MANUEL D'UTILISATION

0	01/08/2014	GFX	EVE	MFE	GEOSTAB 2013
Indice	Date	Etabli par	Vérifié par	Approuvé par	Observations

\\Srvibm2\Document Logiciels GEOS\GEOMUR\GEOMUR_GFX\Manuel Utilisation GeoMur_GFX.docx

Réf. projet :	Réf. document :	Date :
-	Manuel Utilisation GEOSTAB 2013	1er août 2014

GEOS INGENIEURS CONSEILS
GENIE CIVIL GEOTECHNIQUE HYDRAULIQUE

Table des Matières

COPYRIGHT 6

AVERTISSEMENT 6

INTRODUCTION 7

UTILISATION DU LOGICIEL 9

1. INSTALLATION 9
   - 1.1 Configuration minimale 9
   - 1.2 Installation du logiciel 9
2. PREPARATION DES DONNEES 12
   - 2.1 Généralités 12
   - 2.2 Description de l'interface 12
3. SAISIE DES DONNEES 17
   - 3.1 Préférences du logiciel 17
   - 3.2 Saisie du cartouche et des caractéristiques du dessin 17
   - 3.3 Saisie du profil 18
   - 3.4 Gestion des sols 25
   - 3.5 Saisie des conditions d'eau 30
   - 3.6 Saisie des charges 37
   - 3.7 Saisie des inclusions 39
   - 3.8 Saisie des données sismiques 51
   - 3.9 Saisie des coefficients de sécurité partiels 52
   - 3.10 Saisie des surfaces de rupture 55
4. OUTILS (FONCTIONS D'AIDE A LA SAISIE) 66
   - 4.1 Fonctions sur les objets 66
   - 4.2 Opérations dans le journal 67
   - 4.3 Mesure des distances 67
   - 4.4 Fonctions sur le profil 68
   - 4.5 Ajouts d'étiquettes ou de sondages 69
   - 4.6 Zone des 3H 70
5. GESTION DU PHASAGE 71
   - 5.1 La modification d'objets 71
   - 5.2 Ajout et suppression de Phase / Cas 71
   - 5.3 Modification des phases 72
6. LE CALCUL GEOSTAB 73
   - 6.1 Vérification des données 73

GEOS INGENIEURS CONSEILS
GENIE CIVIL GEOTECHNIQUE HYDRAULIQUE

6.2 Lancement du calcul 73
6.3 Fin de calcul : Affichage de la feuille de résultats 74
6.4 Visualiser le fichier résultats 78

CONSIDERATIONS THEORIQUES 80
1. GENERALITES 80
2. GENERALITES SUR LA METHODE DES TRANCHES 83
3. METHODE DE FELLENIUS 86
4. METHODE DE BISHOP 87
4.1 Méthode de Bishop modifiée 87
4.2 Méthode de Bishop rigoureuse 87
4.3 Méthode de Bishop modifiée étendue : Méthode de Carter 91
5. METHODE DES PERTURBATIONS 95
5.1 Principe 95
5.2 Mise en équations 95
5.3 Choix de σ_0 et v 96
6. MODELISATION 97
6.1 Coefficients de sécurité partiels 97
6.2 Paramètres de sol 98
6.3 Prise en compte de l'eau 98
6.4 Prise en compte des inclusions 100
6.5 Surfaces de rupture 106
6.6 Prise en compte des sollicitations sismiques 108
7. CALCULS SUR LES CLOUS 110
7.1 Clous - Efforts au parement 110
7.2 Calcul des longueurs optimisées de clous 111
8. VERIFICATION DE KRANZ 113
8.1 Généralités 113
8.2 Mécanismes de rupture 113
8.3 Définition du facteur de sécurité de Kranz 113
8.4 Equations de base 113

BIBLIOGRAPHIE 116

ANNEXE A: CARACTERISTIQUES DES CLOUS ET EPINGLES 118

ANNEXE B : MODULE DE REACTION DU SOL 121

ANNEXE C : COEFFICIENTS DE SECURITE PARTIELS 122

ANNEXE D : ACCELERATIONS SISMIQUES 125

ANNEXE E : DEVELOPPEMENT DE LA METHODE DE CARTER 126

Table des figures

Figure 1 : Entrée du code d'activation 9
Figure 2 : Menu « Fichier » 12
Figure 3 : Menu « Préparation des données » 13
Figure 4 : Menu « calcul » 13
Figure 5 : Menu « Outils » 13
Figure 6 : Menu « Affichage » 14
Figure 7 : La barre d'informations 15
Figure 8 : Fenêtre graphique 16
Figure 9 : Gestion des phases 16
Figure 10 : Fenêtre « Préférences » 17
Figure 11 : Configuration du cartouche 17
Figure 12 : Caractéristiques du dessin 18
Figure 13 : Orientation du profil 18
Figure 14 : Saisie de la géométrie 19
Figure 15 : Création de segments 19
Figure 16 : Cas des segments verticaux 20
Figure 17 : Création de segments (manuel) 20
Figure 18 : Position de l'image de fond 21
Figure 19 : Echelle de l'image de fond 21
Figure 20 : Importation de fichier Autocad 21
Figure 21 : Modification de segments 22
Figure 22 : Prolonger/Raccourcir un segment 22
Figure 23 : Insertion d'un point 23
Figure 24 : Déplacer un point 23
Figure 25 : Fusionner des points 24
Figure 26 : Intersection du TN 24
Figure 27 : Caractéristiques des sols 25
Figure 28 : Caractéristiques des sols 26
Figure 29 : Définition de l'anisotropie 27
Figure 30 : Directions d'anisotropie 27
Figure 31 : Modélisation de l'anisotropie 28
Figure 32 : Variation de la cohésion 28
Figure 33 : Configuration « Horizontal au sommet de la couche » 29
Figure 34 : Configuration « Parallèle au toit de la couche » 29
Figure 35 : Critère théorique Mohr-Coulomb 29
Figure 36 : Variation de l'angle de frottement 29
Figure 37 : Association des sols 30
Figure 38 : Association à un groupe de segments 30
Figure 39 : Saisie des conditions d'eau 30
Figure 40 : Gestion des nappes 31
Figure 41 : Création nappe graphique 32
Figure 42 : Visualisation d'une nappe définie point par point dans la fenêtre de résultats 32
Figure 43 : Création de nappe manuelle 33
Figure 44 : Association des nappes 33
Figure 45 : Nappe - Insertion d'un point 34
Figure 46 : Nappe – Déplacer un point 34
Figure 47 : Définition des pressions interstitielles 35
Figure 48 : Définitions pressions constantes 35
Figure 49 : Sélection du fichier de pressions interstitielles 36
Figure 50 : Saisie d'une surcharge 37
Figure 51 : Visualisation des surcharges 37
Figure 52 : Inclinaison des surcharges 38
Figure 53 : Saisie d'une force linéaire 38
Figure 54 : Visualisation des forces linéaires 39
Figure 55 : Inclinaison des charges 39

Figure 56 : Choix de l'inclusion *39*
Figure 57 : Insertion d'une épingle *40*
Figure 58 : Insertion d'un clou *40*
Figure 59 : Mode d'orientation des inclusions *41*
Figure 60 : α > 0 sens horaire, Clou en traction *41*
Figure 61 : α < 0 sens antihoraire, Clou en compression *41*
Figure 62 : Définition d'un clou sous GEOSTAB (lié au parement) *41*
Figure 63 : Définition d'une épingle sous GEOSTAB (libre en tête) *41*
Figure 64 : Paramétrage du multicritère *42*
Figure 65 : Configuration – calcul des efforts au parement *43*
Figure 66 : Saisie des tirants *44*
Figure 67 : Option 0 ..... *44*
Figure 68 : Option 2 ..... *44*
Figure 69 : Option 1 ..... *45*
Figure 70 : Option 3 ..... *45*
Figure 71 : Vérification de Kranz *46*
Figure 72 : Modélisation du tirant *46*
Figure 73 : Kranz – Surfaces de ruptures *47*
Figure 74 : Saisie d'un massif géotextile *48*
Figure 75 : Visualisation Massif géotextile *49*
Figure 76 : Saisie d'un massif Terre Armée *50*
Figure 77 : Saisie du séisme *52*
Figure 78 : Séisme pesant *52*
Figure 79 : Séisme allégeant *52*
Figure 80 : Saisie des coefficients de sécurité partiels *53*
Figure 81 : Choix de la combinaison / approche de calcul *54*
Figure 82 : Répartition des actions et des sols *54*
Figure 83 : Visualisation de l'enveloppe des coefficients partiels *55*
Figure 84 : Choix du modèle de surface de rupture *55*
Figure 85 : Surfaces circulaires *56*
Figure 86 : Visualisation des zones d'entrée et sortie *56*
Figure 87 : Règles AFPS *57*
Figure 88 : Evolution de FS sur l'intervalle de sortie *57*
Figure 89 : Résultats - Evolution Fs *58*
Figure 90 : Génération par les centres *59*
Figure 91 : Modes de calculs – Génération par les centres *59*
Figure 92 : Résultats - cercles de rupture selon les centres *60*
Figure 93 : Vérification d'une surface *61*
Figure 94 : Surfaces en spirales *62*
Figure 95 : Boite de passage imposé d'une surface *62*
Figure 96 : Plans et coins - Poussée Butée *63*
Figure 97 : Visualisation - Surfaces par plans et coins *63*
Figure 98 : Visualisation – Surfaces par plans et cercles *64*
Figure 99 : Surfaces point par point *64*
Figure 100 : Visualisation - Surface point par point *64*
Figure 101 : Résultats - Surfaces aléatoires *65*
Figure 102 : Reproduction des caractéristiques d'un objet *66*
Figure 103 : Suppression d'objet *66*
Figure 104 : Activer/Désactiver un objet *67*
Figure 105 : Mesures de distances *68*
Figure 106 : Transformation du profil *68*
Figure 107 : Translation *68*
Figure 108 : Prolongement / troncature du profil *69*
Figure 109 : Ajout d'une étiquette *69*
Figure 110 : Saisie des sondages *70*
Figure 111 : Définition de la zone des 3H *70*
Figure 112 : Délimitation de la zone des 3H *70*
Figure 113 : Menu Ajout / Suppression de phase ou cas *71*

Figure 114 : Ajout d'une phase ou d'in cas *71*
Figure 115 : Modification des phases *72*
Figure 116 : Vérification des données *73*
Figure 117 : Sélection des Phases/Cas à calculer *74*
Figure 118 : Exemple de fichier résultat *75*
Figure 119 : Affichage des résultats par cas *76*
Figure 120 : Menu "Commande" *77*
Figure 121 : Visualisation des diagrammes de poussée *77*
Figure 122 : Choix de l'échelle *77*
Figure 123 : Sélection des phases à imprimer *78*
Figure 124 : Paramètres d'impression *78*
Figure 125 : Copie du fichier résultat *78*
Figure 126 : Fichier résultat *79*

Table des Tableaux

Tableau 1 : Sols – Données et unités *26*
Tableau 2 : Caractéristiques - Anisotropie *27*
Tableau 3 : Données et unités du multicritère *42*
Tableau 4 : Tirants - Données et unités *45*
Tableau 5 : Massif géotextile – Données et unités *49*
Tableau 6 : Massif Terre Armée – Données et unités *51*
Tableau 7 : Séisme – Données et unités *52*
Tableau 8 : Objets modifiables *71*

COPYRIGHT

Le logiciel GEOSTAB, développé par la société GEOS INGENIEURS CONSEILS, est protégé au titre des droits d'auteurs appliqués aux logiciels informatiques.

Toute utilisation sans licence, même partielle, est interdite sans autorisation préalable. Toute reproduction ou imitation des sorties graphiques et fichiers résultats constitue une contrefaçon passible des peines prévues par la loi.

La société GEOS INGENIEURS CONSEILS a fait tout son possible pour fournir un logiciel de qualité et conforme aux règlementations en vigueur ainsi qu'un manuel complet. Cependant, celle-ci décline toute responsabilité quant à l'utilisation du logiciel GEOSTAB et aux réalisations découlant de son utilisation. Dans ce manuel, les données ne sont fournies qu'à titre d'exemple et ne dispensent pas l'utilisateur de définir les paramètres d'entrée du logiciel GEOSTAB.

AVERTISSEMENT

GEOSTAB est un outil pour calculer les contraintes d'un objet simple par application de méthodes de calcul définies ; l'objet simple de calcul est défini par l'ingénieur qui retient quelques caractéristiques mécaniques et géométriques et envisage certains phénomènes physiques.

Cet objet simple ne représente pas un objet réel, tel qu'un talus, une pente ou un fond de fouille. Il reste un objet virtuel, permettant à un ingénieur d'évaluer le comportement d'un objet réel.

GEOSTAB applique des méthodes de calcul définies à un objet virtuel simple.

Il appartient à l'ingénieur d'apprécier si l'outil de calcul GEOSTAB est utilisable pour modéliser le comportement de l'ouvrage.

L'ingénieur doit définir les phénomènes physiques qu'il prend en compte pour concevoir son ouvrage ; il définit l'objet modèle.

L'ingénieur doit apprécier si le choix de la méthode de calcul utilisée par GEOSTAB est compatible avec l'ouvrage réel.

L'ingénieur choisit l'outil de calcul qui lui paraît adapté ; il opère seul la modélisation de l'objet réel (processus de réduction d'un objet réel à un objet virtuel simple) ; il décide seul de prendre en compte le résultat obtenu sur l'objet virtuel simple pour définir le comportement de l'objet réel.

INTRODUCTION

Le logiciel GEOSTAB permet de calculer le coefficient de sécurité sur la stabilité :

- des pentes,
- des talus de déblais et de remblais renforcés ou non,
- des murs de soutènement éventuellement ancrés,
- des parois clouées ou tirantées (avec calcul de la longueur optimisée des clous),
- des massifs de terrain soumis au tirantage selon la méthode de KRANZ.

La gestion des phases et des cas de calcul permet de simplifier l'étude d'un projet, puisqu'en un seul fichier, il est possible d'envisager, par simple (dés)activation d'éléments :

- diverses configurations géométriques,
- plusieurs comportements de sols,
- différentes sollicitations (statique, sismique),
- des méthodes de calcul distinctes.

La modélisation des sols peut être plus ou moins avancée :

- l'introduction de paramètres géotechniques simples (poids volumique, cohésion, angle de frottement) peut suffire à lancer les calculs,
- une anisotropie de cohésion et/ou d'angle de frottement est modélisable pour les sols rocheux,
- une variation de la cohésion en fonction de la profondeur et de l'angle de frottement en fonction de la pression de couverture peut être introduite dans des modèles plus fins.

L'effet de l'eau est pris en compte par :

- la différence de niveaux entre la ou les nappes et la base des tranches,
- l'introduction d'une pression interstitielle constante u ou d'un paramètre de pression ru dans le sol,
- l'introduction des pressions interstitielles selon un semis de points résultant d'un calcul par différences finies ou éléments finis.

Les surcharges peuvent être introduites :

- par des forces linéaires,
- par des surcharges,
- par une hauteur d'eau au-dessus du terrain naturel.

L'effet du séisme est pris en compte par un calcul pseudo statique avec :

- pour les surfaces circulaires, rotation de la géométrie selon les recommandations de l'AFPS sauf si cela conduit à des surplombs, dans ce cas, le séisme est pris en compte par ajout d'un moment extérieur dans les équations d'équilibre,
- pour les surfaces non circulaires, ajout des forces sismiques dans les équations d'équilibre.

Les renforcements peuvent être de différentes natures :

- inclusions subhorizontales (clous) ou subverticales (inclusions rigides, profilés, …),
- tirants,
- épingles,
- géotextiles,
- Terre-Armée.

Les coefficients partiels choisis peuvent être :

- issus des normes françaises d'application de l'Eurocode 7,
- issus des recommandations CLOUTERRE,
- différents entre l'intérieur et l'extérieur d'une enveloppe définie par l'utilisateur,
- personnalisables.

Les surfaces de rupture peuvent être :

- circulaires et inconnues avec une recherche par une boîte de centres ou par intervalles d'entrées/sorties
- circulaires et connues avec calcul du facteur de sécurité en fonction des coordonnées du cercle,
- en spirales logarithmiques avec une recherche par intervalles d'entrées/sorties,
- non circulaires avec un ou des plans prolongés à l'amont par un coin de poussée et à l'aval par un coin de butée ou par des cercles,
- suivant des plans définis point par point,
- aléatoires.

Les méthodes de calcul sont :

- BISHOP modifiée avec pour facteur initial des itérations FELLENIUS pour les surfaces circulaires.
- CARTER pour les surfaces non circulaires (extension de la méthode de BISHOP modifiée).
- PERTURBATIONS aussi bien pour les surfaces circulaires que non-circulaires.

UTILISATION DU LOGICIEL

1. Installation

1.1 Configuration minimale

Le logiciel GEOSTAB fonctionne sous les systèmes d'exploitation Microsoft XP, Vista, 7, 8.

1.2 Installation du logiciel

Quelle que soit la version que vous voulez installer, il est nécessaire, et notamment sous Windows Vista, 7 et 8, d'être administrateur du poste sur lequel vous installez GEOSTAB.

1.2.1 *Version d'évaluation*

La version d'évaluation est une version limitée dans le temps pour laquelle toutes les fonctionnalités du logiciel sont utilisables.

Un lien d'installation vous a été envoyé par GEOS INGENIEURS CONSEILS. Cliquer sur celui-ci pour télécharger le fichier d'installation. Une fois les fichiers d'installation décompressés, cliquer sur le fichier « setup.exe ». Suivez ensuite les différentes étapes de l'assistant d'installation du logiciel.

Le premier lancement du logiciel est à faire en tant qu'administrateur (cf. paragraphe 1.2.4), puis cliquer sur « Exécuter en tant qu'administrateur »), la fenêtre suivante apparaît :

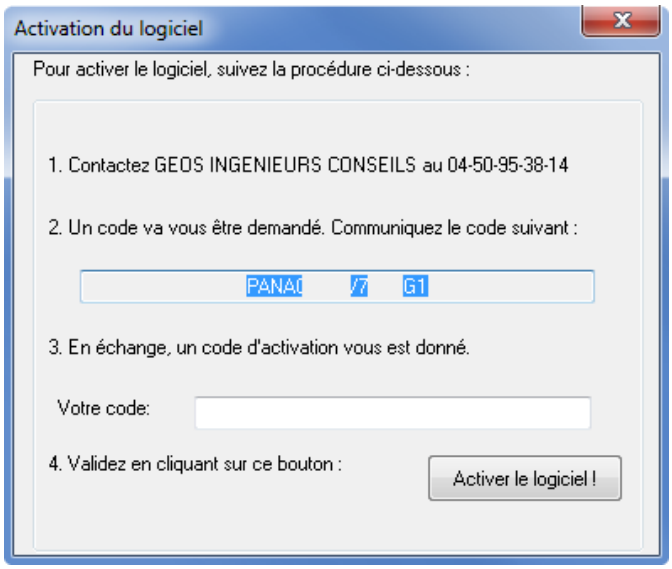

Activation du logiciel
Pour activer le logiciel, suivez la procédure ci-dessous :
1. Contactez GEOS INGENIEURS CONSEILS au 04-50-95-38-14
2. Un code va vous être demandé. Communiquez le code suivant :
PANAC /7 G1
3. En échange, un code d'activation vous est donné.
Votre code:
4. Validez en cliquant sur ce bouton :
Activer le logiciel !

Figure 1 : Entrée du code d'activation

Communiquez à GEOS INGENIEURS CONSEILS le code donné par le logiciel (partie 2 de la procédure de la boîte de dialogue ci-contre).

En retour, vous recevrez un code d'activation qu'il faudra renseigner dans la partie 3 de la procédure de la boîte de dialogue ci-contre.

Cliquez enfin sur le bouton « Activer le logiciel ».

Une nouvelle boîte de dialogue apparaît, vous confirmant que l'activation du logiciel s'est bien déroulée et vous donnant la date jusqu'à laquelle le logiciel est actif.

1.2.2 *Version intégrale*

Il est nécessaire de désinstaller toutes les versions de GEOSTAB présentes sur le poste avant d'installer une version intégrale du logiciel.

Quel que soit le type de protection, l'installation du logiciel se fait de la manière suivante :

- Exécuter le fichier « Setup.exe » situé sur le CD ROM fourni ou téléchargé depuis le lien envoyé par GEOS INGENIEURS CONSEILS (en décompressant le dossier téléchargé) ;

- Suivre les différentes étapes de l'assistant d'installation du logiciel.

- Une fois l'installation terminée, exécutez le raccourci « Geostab 2013.exe »

A la première exécution, il faut indiquer au logiciel le type de protection auquel il est soumis : par code, par clé ou par serveur.

1.2.2.1 Version protégée par code

L'activation de la version protégée par code est identique à celle de la version d'évaluation. Ce type de protection est généralement utilisé comme moyen d'utiliser pleinement le logiciel pendant une période temporaire.

1.2.2.2 Version protégée par clé

Il s'agit du mode de protection le plus courant. Insérez la clé de protection fournie avec le CD ROM dans un port USB.

Pour que la clé soit reconnue, il est nécessaire d'installer le programme Sentinel disponible sur le CD-ROM.

1.2.2.3 Version serveur

La version serveur permet de partager plusieurs licences d'un logiciel via un serveur sans avoir besoin de clé de protection sur chaque poste.
Avant d'exécuter GEOSTAB en version serveur, il faut installer et configurer le logiciel GEOSERVEUR selon le manuel fourni avec ce logiciel.

1.2.3 *Modification du système de protection*

Dans la version intégrale, il est possible de modifier le système de protection :

- soit en cliquant sur le bouton « changer » disponible depuis le sous-menu « A propos de GEOSTAB » du menu « ? » du logiciel ;

- soit en supprimant le fichier « mode.geo » présent :

    - dans le répertoire caché « C:\ProgramData\GEOS\Geostab » pour les systèmes d'exploitation type Windows Vista et 7 ;

    - dans le répertoire caché « C:\Documents and Settings\All Users\Application Data\GEOS\Geostab » pour les systèmes d'exploitation type Windows XP.

Il suffit ensuite de relancer le logiciel pour pouvoir choisir le nouveau type de protection.

1.2.4 *Problèmes liés aux droits d'administration*

Sous les systèmes d'exploitation Windows Vista, 7 et 8, si vous n'installez pas GEOSTAB en tant qu'administrateur, il se peut que le logiciel ne fonctionne pas correctement. La clé (s'il s'agit de ce mode de protection) n'est pas reconnue et il est impossible de sélectionner le mode de protection.

Pour remédier à ce problème, il faut donner les droits à tous les utilisateurs sur le répertoire d'installation de tous les logiciels GEOS :

- Faites un clic droit sur le répertoire d'installation des logiciels GEOS (c:\Program Files\GEOS),
- Choisissez « Propriétés »,
- Cliquez sur l'onglet « Sécurité », puis sur « Modifier »,
- Ajoutez un nouvel utilisateur en cliquant sur le bouton « Ajouter »,
- Dans la zone de texte qui apparaît, écrivez « tout le monde » en respectant la casse,
- Cliquez sur « Valider »,
- Sélectionnez ensuite « Contrôle total »,
- Validez toutes les fenêtres ouvertes en cliquant sur « OK ».

En outre, lors de l'activation du logiciel par code (en version d'évaluation ou en version intégrale), il faut exécuter le logiciel « en tant qu'administrateur » même si l'utilisateur est administrateur. Pour cela :

- Faites un clic droit sur l'application « Geostab 2013.exe » se trouvant dans le répertoire d'installation du logiciel (par défaut : c:\Program Files\GEOS\Geostab).
- Cliquez sur « Exécuter en tant qu'administrateur ».

2. Préparation des données

2.1 Généralités

Unités

Il est recommandé d'utiliser le kN et le m conformément au système dit SI. Cependant, aucune unité n'est imposée, le système d'unités devant rester homogène aux unités citées ci-dessus.

Taille maximale du problème

La structure du logiciel impose une limitation sur la taille des données :

Nbre points de la géométrie par phases	200
Nombre sols	30
Nombre nappes par phase	5
Nombre points par nappe	40
Nombre clous + épingles	40
Nombre phases	40

Nombre tirants	20
Nombre nappes géotextiles	60
Nombre nappes armatures	60
Nombre surcharges	20
Nombre forces linéaires	20
Nombre de cas par phase	20

2.2 Description de l'interface

La nouvelle version de GEOSTAB intègre une interface visant à faciliter la saisie des données. Cette interface se décompose en quatre parties de dimensions personnalisables :

- des barres d'outils et de menu ;
- une fenêtre graphique ;
- un cartouche résumant la situation courante ;
- une fenêtre de gestion des phases et cas.

2.2.1 *Description de la barre de menus*

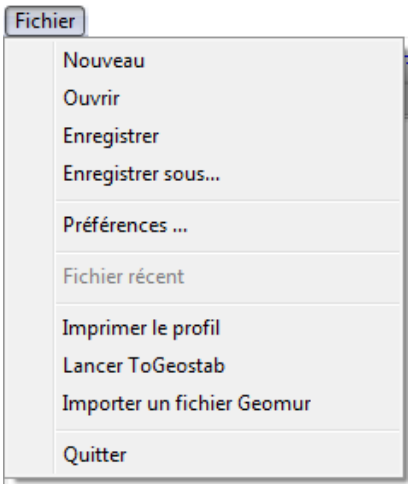


Figure 2 : Menu « Fichier »

Le menu « Fichier » permet de réaliser les opérations courantes sur les fichiers de données.

Le sous–menu « Préférences » permet de choisir le langage de l'interface et des sorties graphiques de GEOSTAB (suivant options), de choisir le logo qui sera affiché sur les sorties graphiques, et de choisir par défaut le mode couleur.

L'option « Lancer ToGeostab » exécute dans une fenêtre indépendante l'utilitaire concerné (cf. manuel d'utilisation spécifique).

L'option « Importer un fichier Geomur » permet d'importer un fichier GEOMUR.

L'option « Imprimer le profil » permet d'imprimer les profils et les données d'entrées des cas étudiés.

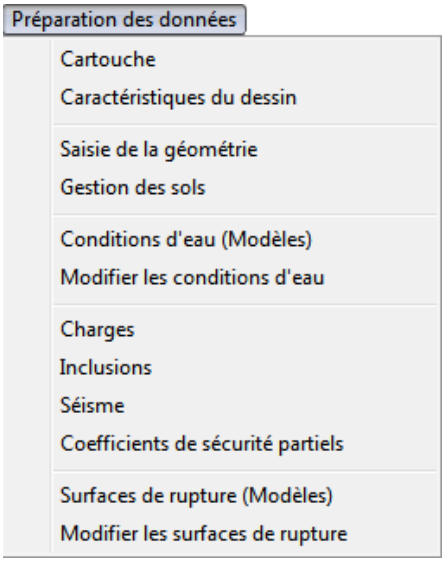


Figure 3 : Menu « Préparation des données »

Le menu « Préparation des données » guide l'utilisateur à travers toutes les étapes de modélisation des problèmes. Ces étapes sont décrites individuellement dans la suite du manuel.

Le calcul peut très bien fonctionner même si l'utilisateur n'a pas complété toutes les étapes. S'il manque des informations non saisies par l'utilisateur ou si ces informations sont à priori aberrantes, cela est signalé dans les « Warnings » précédant le calcul.

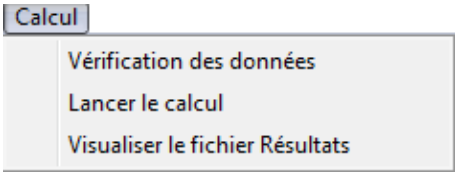


Figure 4 : Menu « calcul »

Le menu « Calcul » donne accès au calcul et à la procédure de vérification des données.
Une fois le calcul effectué, il est possible de consulter le contenu du fichier de résultats produit pour la phase courante et le cas courant

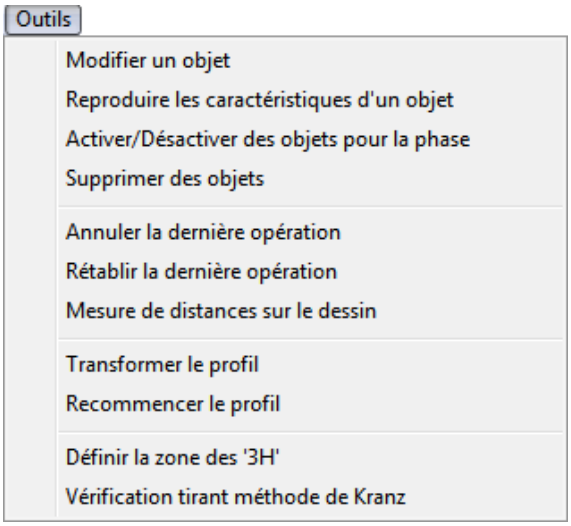

Outils
Modifier un objet
Reproduire les caractéristiques d'un objet
Activer/Désactiver des objets pour la phase
Supprimer des objets
Annuler la dernière opération
Rétablir la dernière opération
Mesure de distances sur le dessin
Transformer le profil
Recommencer le profil
Définir la zone des '3H'
Vérification tirant méthode de Kranz

Figure 5 : Menu « Outils »

L'utilisateur dispose d'une gamme d'outils destinés à faciliter la saisie de la géométrie, disponibles depuis le menu « Outils ».

L'utilisateur a la possibilité d'annuler ou de rétablir la dernière opération, dans la limite de 30 actions effectuées.

La zone des « 3H » est définissable au sein de ce menu. L'option « transformer » permet de translater le profil saisi, de l'inverser, de le prolonger ou de le tronquer.

L'option « Mesurer de distances sur le dessin » permet de mesurer des distances entre deux points du profil ou de mesurer des angles par rapport à l'horizon et la verticale.

L'outil « Vérification méthode de Kranz » permet de vérifier la stabilité du massif de sol soumis à un tirantage, en accord avec l'annexe G de la norme NF P 94-282.

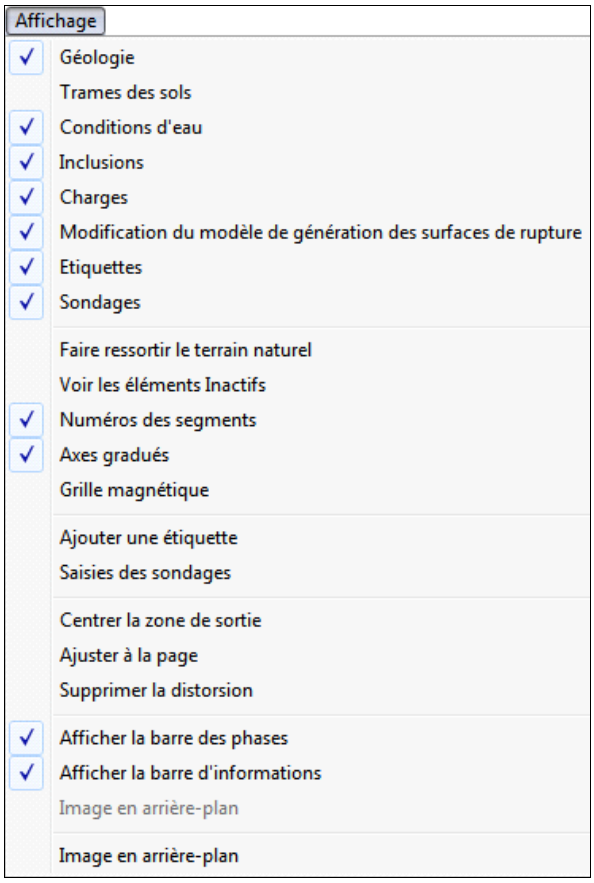


Figure 6 : Menu « Affichage »

Le menu « Affichage » permet de modifier les options de l'affichage au sein du logiciel.

Tous les objets peuvent être masqués afin de faciliter la saisie d'autres objets.

Pour mettre en « gras » la couche supérieure de la géométrie, il faut faire appel à l'option « Faire ressortir le terrain naturel ».

Pour une meilleure visualisation, il est possible de modifier l'affichage de la zone de sortie avec les options « Centrer la zone de sortie » et « Ajuster à la page ».

Les options « Ajouter une étiquette » et « Saisie des sondages » permettent de personnaliser la fenêtre graphique et le profil de sortie en ajoutant les sondages du profil, ainsi que des commentaires textuels.

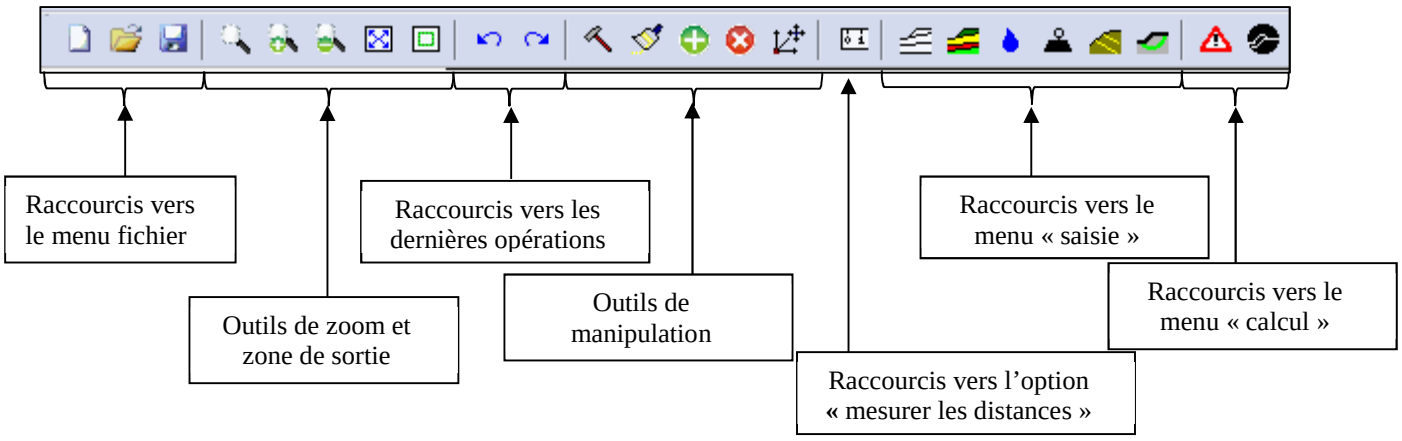
L'option « Voir les éléments Inactifs » permet de visualiser les objets désactivés de la phase courante.

Les options « Afficher la barre des phases », « Afficher la barre d'informations » et « Afficher la barre d'outils » permettent de personnaliser l'interface lors de la saisie du profil.

Il est également possible d'afficher une image en arrière-plan pour le dessin du profil par exemple. Celle-ci doit être au format « .bmp ».

2.2.2 *Description de la barre d'outils*

Lorsque le curseur de la souris est positionné sur une icône, un message d'aide apparaît indiquant la fonction précise du bouton.


Raccourcis vers le menu fichier
Outils de zoom et zone de sortie
Raccourcis vers les dernières opérations
Outils de manipulation
Raccourcis vers l'option « mesurer les distances »
Raccourcis vers le menu « saisie »
Raccourcis vers le menu « calcul »

Raccourcis vers le menu fichier:
1- Création d'un nouveau fichier.
2- Ouverture d'un fichier.
3- Enregistrement d'un fichier.

Outils de zoom et zone de sortie :
4- Zoom boîte, permet un zoom à l'intérieur d'un cadre à définir.
5- Zoom plus (agrandir).
6- Zoom moins (rétrécir).
7- Ajustement du profil à la page (voir tout le profil).
8- Centrage sur la zone de sortie (sur la zone d'impression).

Raccourcis vers les dernières opérations :
9- Annulation de la dernière opération.
10- Rétablissement de la dernière opération.

Outils de manipulation d'objets :
11- Modification d'un objet.
12- Reproduction des caractéristiques d'un objet.
13- Activation/Désactivation d'objet pour la phase.
14- Suppression d'un objet.
15- Transformer le profil (translater, inverser, prolonger, tronquer le profil).
16- Mesure de distances sur le dessin.

Raccourcis vers le menu « saisie » :
17- Saisie de la géométrie.
18- Gestion des sols.
19- Gestion des caractéristiques du modèle hydrologique.
20- Création d'une surcharge ou d'une force linéaire.
21- Création d'une inclusion.
22- Modification du modèle de génération des surfaces de rupture.

Raccourcis vers le menu calcul :
23- Vérification des données.
24- Lancement du calcul.

2.2.3 *La barre d'informations*

La barre d'informations résume la situation courante et permet quelques opérations sur la fenêtre graphique. Elle peut être flottante ou ancrée à l'écran général. Une fois fermée, il est possible de la faire réapparaître via le menu « Affichage » présenté précédemment.

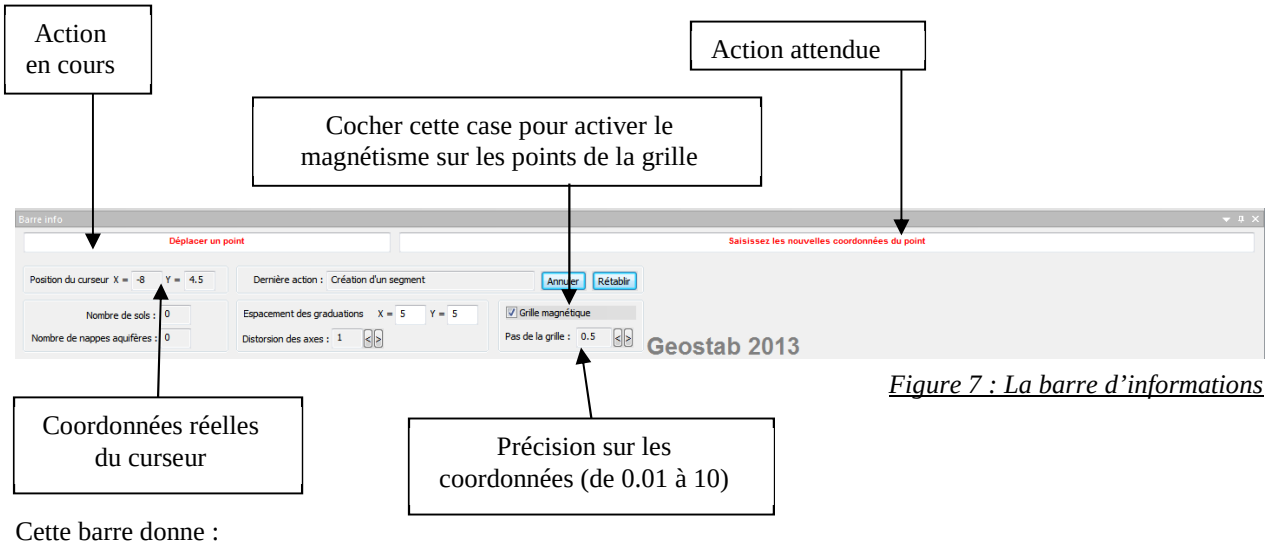

Action en cours
Action attendue
Cocher cette case pour activer le magnétisme sur les points de la grille
Barre info
Déplacer un point
Saisissez les nouvelles coordonnées du point
Position du curseur X = -8 Y = 4.5
Dernière action : Création d'un segment
Annuler
Rétablir
Nombre de sols : 0
Nombre de nappes aquifères : 0
Espacement des graduations X = 5 Y = 5
Distorsion des axes : 1
Grille magnétique
Pas de la grille : 0.5
Geostab 2013
Coordonnées réelles du curseur
Précision sur les coordonnées (de 0.01 à 10)

Figure 7 : La barre d'informations

Cette barre donne :

- L'action en cours, en fonction de la boîte de dialogue ouverte.

- L'action attendue, une fois l'objet à modifier sélectionné.

- La dernière action réalisée, qu'il est possible d'« Annuler » en cliquant sur le bouton éponyme ou sur l'icône de la barre d'outils. Il est également possible de « Rétablir » les dernières actions annulées via le bouton ou via l'icône de la barre d'outils. Il est possible d'annuler et/ou de rétablir les 30 dernières actions réalisées.

- La précision des coordonnées sur la grille magnétique, dont le « Pas de la grille », modifiable par les boutons fléchés, varie entre 0.01 à 10. Si la case à cocher « Grille magnétique » est activée, la modification graphique des objets se fera à cette précision près. Si la case à cocher est désactivée, la précision est « infinie ».

- L'espacement des graduations suivant « X = » et suivant « Y = » sur la fenêtre graphique, ainsi que la distorsion entre les axes X et Y (une distorsion supérieure à 1 indique que l'axe X est plus long que l'axe Y ; la « Distorsion des axes » est modifiable par les boutons fléchés).

- La position exacte du curseur, en fonction de la précision sur les coordonnées.

- Le nombre de sols et de nappes définies dans le profil en cours.

2.2.4 *La fenêtre graphique*

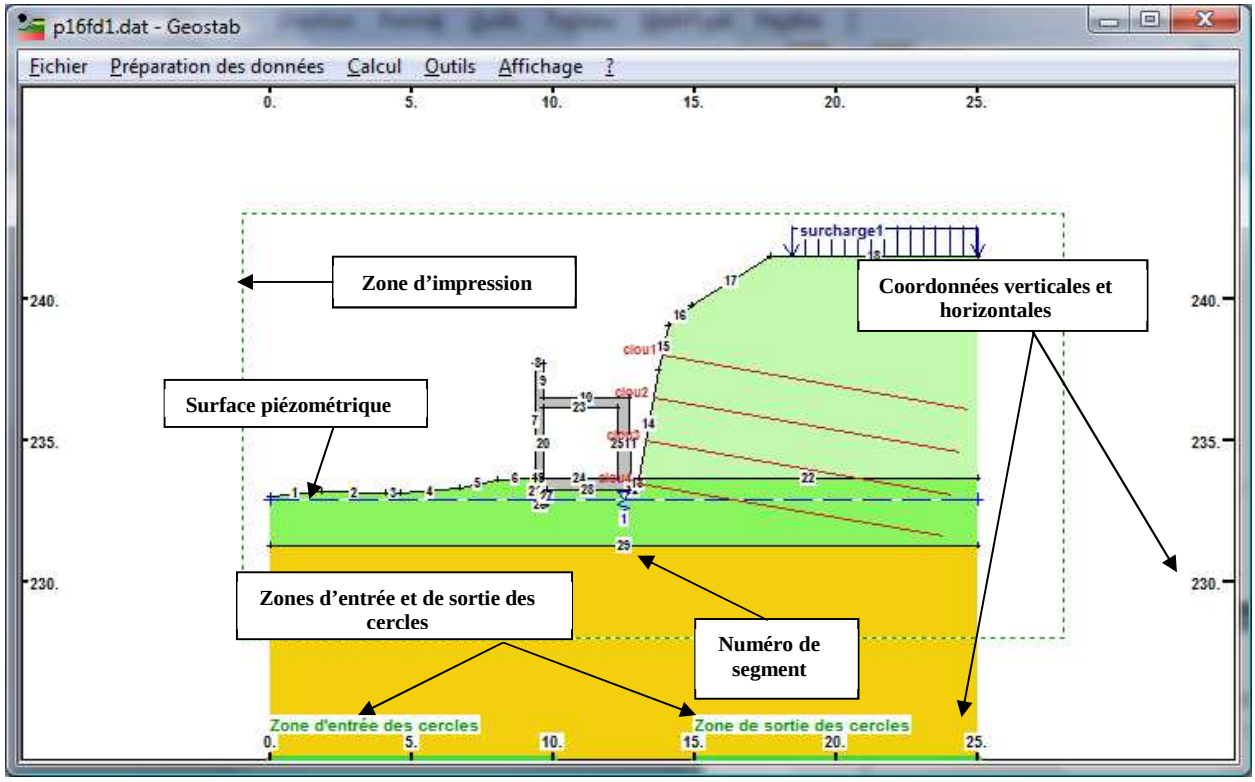
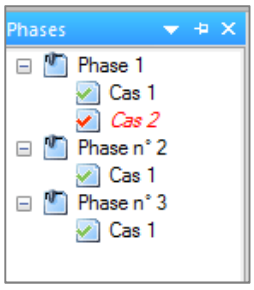


Figure 8 : Fenêtre graphique

La fenêtre graphique permet la visualisation du modèle et des axes de coordonnées, la zone d'impression est également représentée, ainsi que les surfaces de ruptures choisies (ou zones d'entrées et sorties des cercles). Tous les objets affichés dans cette fenêtre sont sélectionnables.

2.2.5 *La fenêtre « gestion des phases »*



Cette fenêtre présente les différentes phases et les différents cas définis par l'utilisateur. Un simple clic avec le bouton gauche de la souris permet d'afficher la phase et le cas correspondant.

Le cas courant est représenté en rouge.

Cette fenêtre peut être masquée, flottante ou ancrée.

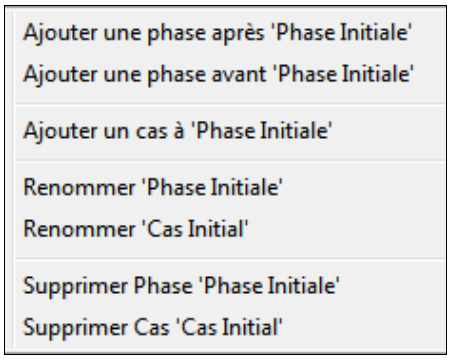

Ajouter une phase après 'Phase Initiale'
Ajouter une phase avant 'Phase Initiale'
Ajouter un cas à 'Phase Initiale'
Renommer 'Phase Initiale'
Renommer 'Cas Initial'
Supprimer Phase 'Phase Initiale'
Supprimer Cas 'Cas Initial'

Figure 9 : Gestion des phases

Pour ajouter, renommer ou supprimer une phase ou un cas, il faut ouvrir le menu déroulant en cliquant sur la liste avec le bouton droit de la souris.

3. Saisie des données

Pour commencer la saisie d'un nouveau document, il faut sélectionner l'option « Nouveau » du menu « Fichier ».

3.1 Préférences du logiciel

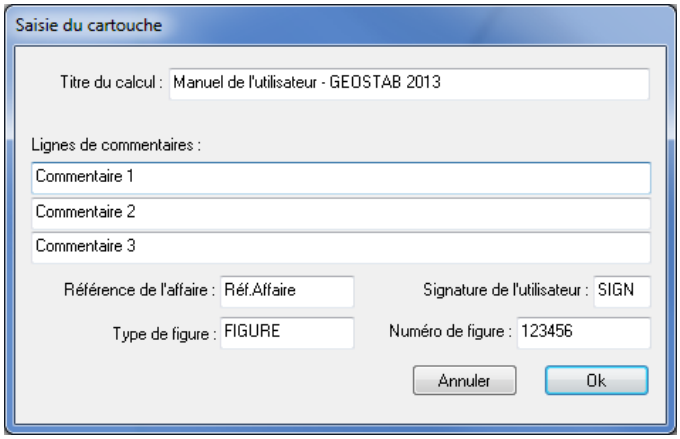
L'option « Préférences », disponible depuis le menu « Fichier » permet de choisir :

- le logo en format BMP de votre société pour que celui-ci apparaisse dans le cartouche de la feuille de résultats,
- la langue de l'interface de saisie,
- la langue à utiliser sur la feuille de résultats,
- l'affichage des profils (interface et feuille de résultats) par défaut en couleur.

Figure 10 : Fenêtre « Préférences »

3.2 Saisie du cartouche et des caractéristiques du dessin

- Option « Cartouche » du menu « Préparation des données ».



Entrer ici tout le descriptif du calcul souhaité sur la feuille de résultat:

- titre,
- divers commentaires,
- numéro de l'affaire,
- numéro et type de figure,
- nom de l'utilisateur,
- numéro de figure.

Réf.Affaire_SIGN JJ/MM/AA HH:MM	Manuel de l'utilisateur - GEOSTAB 2013	Phase Initiale - Cas Initial	FIGURE
Geos Ingénieurs Conseils	Commentaire 1 Commentaire 2 Commentaire 3		123456

Figure 11 : Configuration du cartouche

- Option « Caractéristiques du dessin » du menu « Préparation des données ».

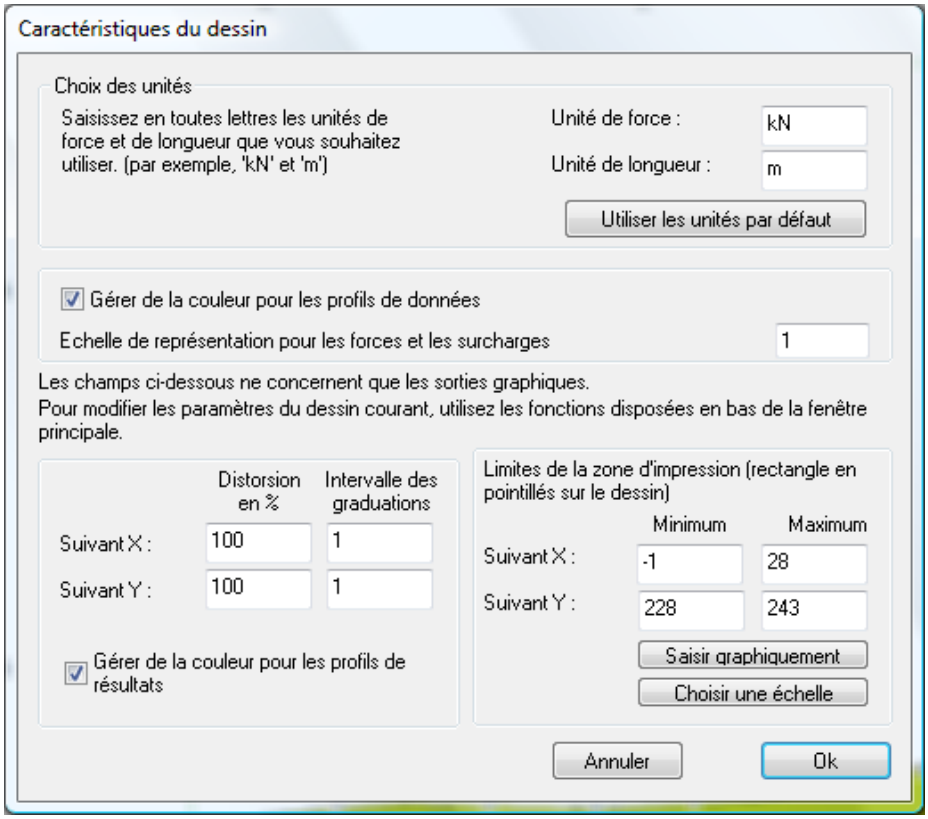

Caractéristiques du dessin
Choix des unités
Saisissez en toutes lettres les unités de force et de longueur que vous souhaitez utiliser. (par exemple, 'kN' et 'm')
Unité de force :
kN
Unité de longueur :
m
Utiliser les unités par défaut
Gérer de la couleur pour les profils de données
Echelle de représentation pour les forces et les surcharges
1
Les champs ci-dessous ne concernent que les sorties graphiques.
Pour modifier les paramètres du dessin courant, utilisez les fonctions disposées en bas de la fenêtre principale.
Distorsion en %
Intervalle des graduations
Suivant X :
100
1
Suivant Y :
100
1
Gérer de la couleur pour les profils de résultats
Limites de la zone d'impression (rectangle en pointillés sur le dessin)
Minimum
Maximum
Suivant X :
-1
28
Suivant Y :
228
243
Saisir graphiquement
Choisir une échelle
Annuler
Ok

Figure 12 : Caractéristiques du dessin

Avertissement :
Les unités peuvent être quelconques à condition qu'elles soient homogènes et de même rapport que les unités par défaut (kN, m) ; ces unités ne sont pas rappelées tout au long de la saisie.

Les propriétés des sorties graphiques (distorsion et intervalle des graduations) ne concernent pas la fenêtre graphique de l'interface.
La zone d'impression (rectangle en pointillés verts) correspond aux limites du dessin des sorties graphiques. Dans l'interface, le centrage et l'échelle du dessin seront automatiquement déterminés en fonction de ces limites.
Le choix de l'échelle de représentation des forces et des surcharges n'a aucune influence sur les calculs. Cette option permet seulement de faire ressortir des forces ou surcharges très faibles, ou de faire entrer dans la zone d'impression des sorties graphiques des forces ou surcharges trop importantes.

3.3 Saisie du profil

Par convention, toute la géométrie du problème doit être située dans le premier quadrant ($X \geq 0$; $Y \geq 0$).
Par convention, l'amont doit se situer à droite du profil (figure 13). Si ce n'est pas le cas sur le profil rentré, il faut utiliser l'option « inverser le profil » disponible depuis le menu « Outils » ou « Transformer le profil ».

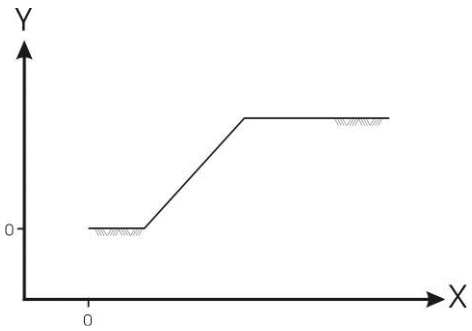


Figure 13 : Orientation du profil

3.3.1 *Saisie de la géométrie*

Sélectionner l'option « Saisie de la géométrie » du menu « Préparation des données ». La fenêtre apparaîtra pour permettre à l'utilisateur de modifier soit les segments du profil, soit sur les points servant à relier les segments.

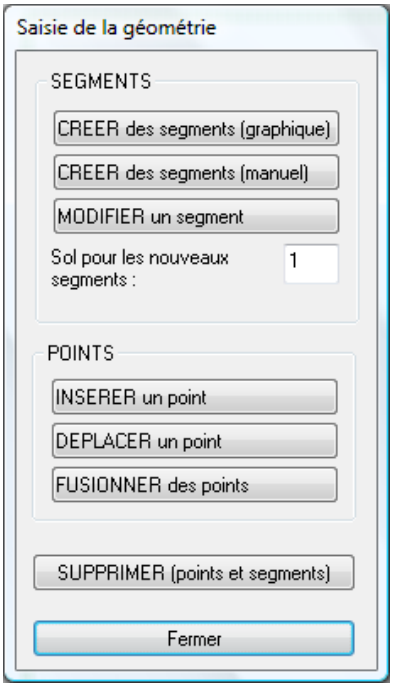


Figure 14 : Saisie de la géométrie

Les principes d'utilisation de chaque bouton sont décrits dans les paragraphes 3.3.2 à 3.3.10.

Tous les segments créés seront automatiquement associés au sol dont le numéro est affiché dans la case prévue à cet effet.

Tous les segments saisis seront actifs pour la phase courante, ainsi que pour les phases suivantes

3.3.2 *Création de segments de profil (en mode graphique)*

Le bouton « Créer des segments (graphique) » laisse place au mode de saisie graphique des segments. Une nouvelle fenêtre s'active et une croix rouge se présente sur la fenêtre graphique afin de commencer la saisie.
Remarque : lors du déplacement du curseur, la position relative du point courant (x,y) s'inscrit dans cette boîte de dialogue.

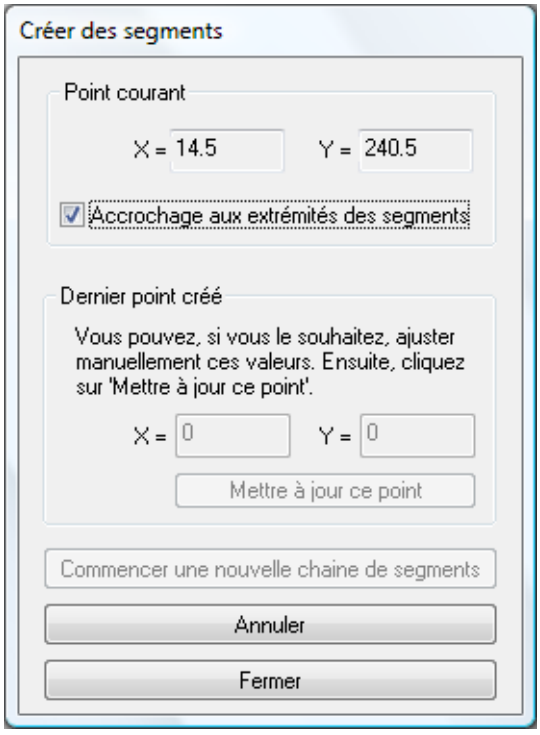

Créer des segments
Point courant
X = 14.5
Y = 240.5
Accrochage aux extrémités des segments
Dernier point créé
Vous pouvez, si vous le souhaitez, ajuster manuellement ces valeurs. Ensuite, cliquez sur 'Mettre à jour ce point'.
X = 0
Y = 0
Mettre à jour ce point
Commencer une nouvelle chaine de segments
Annuler
Fermer

Figure 15 : Création de segments

Mode opératoire :

a- Cliquer pour prendre en compte le point courant dans le profil.

b- Un segment rouge se présente en attente du point suivant. Déplacer le curseur vers le prochain point désiré. Cliquer pour enregistrer ce point.

c- Répéter les actions a et b autant de fois que nécessaire. Les segments en rouge correspondant à la chaîne de segments en cours de construction.

d- Lorsque la saisie du profil arrive à son terme, clôturer la chaîne de segments en cliquant sur le bouton « Fermer ».

e- Si le profil comporte plusieurs chaînes de segments (pour matérialiser des couches par exemple), cliquer sur le bouton « Commencer une nouvelle chaîne de segments » au lieu de cliquer sur le bouton « Fermer ». Réitérer les actions de a à d.

GEOSTAB se chargera de numéroter les segments de profil.

Une option d'accrochage aux extrémités d'un segment préexistant est également disponible.

A partir du moment où un point est créé, ses coordonnées sont ajoutées dans la zone « Dernier point créé », et elles sont modifiables. Il suffit de sélectionner chacune d'entre elles et de leur donner une nouvelle valeur puis de les mettre à jour via le bouton « Mettre à jour ce point » pour que les modifications soient directement prises en compte.

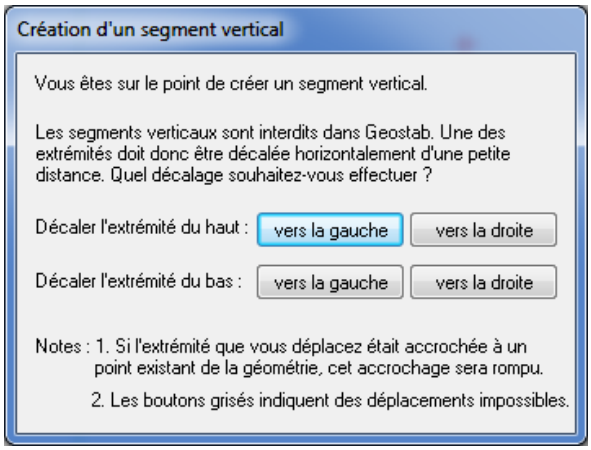

Création d'un segment vertical
Vous êtes sur le point de créer un segment vertical.
Les segments verticaux sont interdits dans Geostab. Une des extrémités doit donc être décalée horizontalement d'une petite distance. Quel décalage souhaitez-vous effectuer ?
Décaler l'extrémité du haut :
vers la gauche
vers la droite
Décaler l'extrémité du bas :
vers la gauche
vers la droite
Notes : 1. Si l'extrémité que vous déplacez était accrochée à un point existant de la géométrie, cet accrochage sera rompu.
2. Les boutons grisés indiquent des déplacements impossibles.

Figure 16 : Cas des segments verticaux

Les segments verticaux sont interdits et peuvent provoquer des erreurs de numérotation des segments. Dans le cas où les coordonnées entrées conduisent à des segments verticaux, une fenêtre automatique propose de décaler une des extrémités.

Le choix de l'extrémité à déplacer est laissé à l'utilisateur. Il est également possible de choisir de décaler le point à gauche ou à droite.

Les déplacements impossibles sont automatiquement grisés par le programme.

3.3.3 *Création de segments de profil (en mode manuel)*

Si l'utilisateur a déterminé son profil à l'avance, il est parfois plus rapide de saisir les coordonnées point par point dans une boîte de dialogue. Pour commencer la saisie, cliquer sur le bouton « **Créer des segments (manuel)** ».

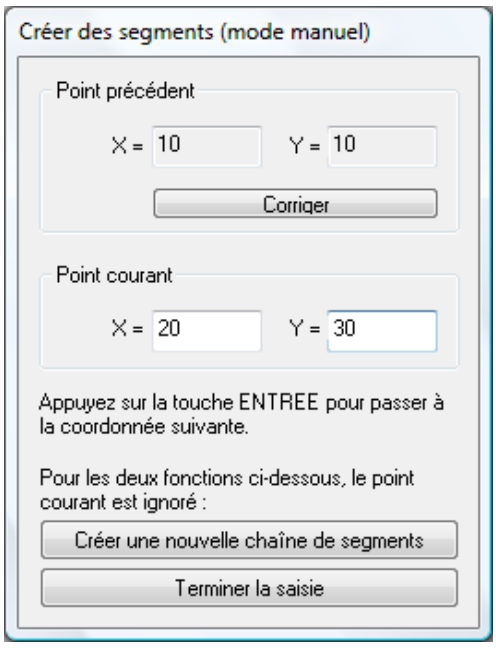

Créer des segments (mode manuel)
Point précédent
X = 10
Y = 10
Corriger
Point courant
X = 20
Y = 30
Appuyez sur la touche ENTREE pour passer à la coordonnée suivante.
Pour les deux fonctions ci-dessous, le point courant est ignoré :
Créer une nouvelle chaîne de segments
Terminer la saisie

Figure 17 : Création de segments (manuel)

Mode opératoire :

a- Entrer les coordonnées du point courant (Passage de l'abscisse à l'ordonnée possible par la touche Entrée).

b- Appuyer sur la touche Entrée pour passer à la saisie du prochain point.

c-Effectuer les actions a et b autant de fois que nécessaire.

d- Lorsque la saisie arrive à son terme cliquer sur le bouton « Terminer la saisie » après avoir validé le dernier point.

e- Si le profil comporte plusieurs chaînes de segments, cliquer sur le bouton « Créer une nouvelle chaîne de segments ». Cela aura pour effet de continuer la saisie sans fermer la boîte de dialogue. Réitérer les actions de a à d.

f- Si au cours de la saisie le dernier point validé doit être modifié, cliquer sur le bouton « Corriger » et les coordonnées seront modifiables dans la zone « Point courant ».

3.3.4 *Importation de données*

Il vous est possible d'importer des données pour faciliter la saisie du profil. Vous pouvez ainsi importer :

- une image d'arrière-plan,
- un profil GEOMUR,
- un profil Autocad.

3.3.4.1 *Importation d'une image de fond*

L'importation d'une image de fond permet le tracé du profil GEOSTAB en suivant le profil image.
Pour accéder à cette option, sélectionner l'option « Image en arrière-plan » du menu « Affichage », puis sur « charger une image » puis sélectionner le profil au format « .bmp »

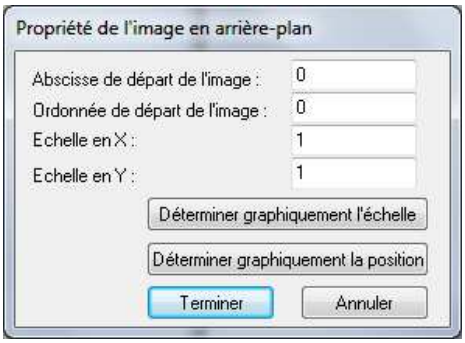


Figure 18 : Position de l'image de fond

Mode opératoire :
a- Saisir les coordonnées du point de départ de l'image, ainsi que son échelle en X et Y.

b- L'échelle et la position peuvent être saisies graphiquement en cliquant les boutons correspondant

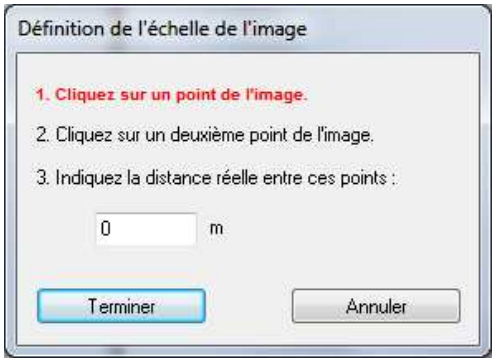

Définition de l'échelle de l'image
1. Cliquez sur un point de l'image.
2. Cliquez sur un deuxième point de l'image.
3. Indiquez la distance réelle entre ces points :
0
m
Terminer
Annuler

Figure 19 : Echelle de l'image de fond

Pour la définition graphique de l'échelle :
Cliquer sur deux points de l'image et saisir la distance réelle entre ces deux points, les échelles X et Y seront déterminée automatiquement

Pour la définition graphique de la position :
Cliquer sur l'image et déplacer celle-ci à la position souhaitée

c- Saisir le profil en suivant graphiquement le profil image

3.3.4.2 *Importation d'un profil GEOMUR*

Pour l'importation de profils GEOMUR il vous suffit de cliquer sur « Fichier », puis sur « Importer un fichier Geomur » et sélectionner le fichier .gmr souhaité. Le profil GEOMUR sera importé dans le logiciel GEOSTAB.

3.3.4.3 *Importation d'un fichier Autocad, Piste ou Excel*

Pour l'importation de profils Autocad, choisir l'option « Lancer ToGeostab » du menu « Fichier », puis sur choisir le type de fichier (Autocad, Piste ou Excel ; Voir manuel de l'application ToGeostab). La fenêtre suivante apparaît.

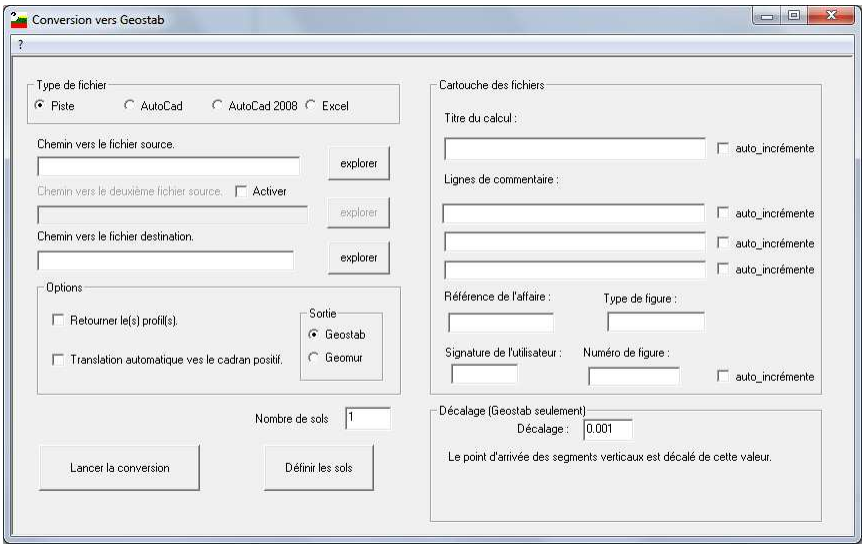


Figure 20 : Importation de fichier Autocad

Mode opératoire :

a- sélectionner le chemin du fichier source et du fichier destination (pour le format voir le manuel de ToGeostab),

b- sélectionner les options souhaitées, définir éventuellement les sols, remplir éventuellement le cartouche du fichier GEOSTAB.

3.3.5 *Modification de segments de profil*

Le bouton « Modifier un segment » permet à l'utilisateur de modifier les coordonnées du segment qu'il aura choisi sur le profil préexistant.
A cet effet, le curseur prend l'apparence d'un carré noir symbolisant le fait qu'un segment doit être modifié. Lorsqu'un segment est survolé, il est surligné en rouge (pointillés dans le cas de segments désactivés), donc il est sélectionnable.

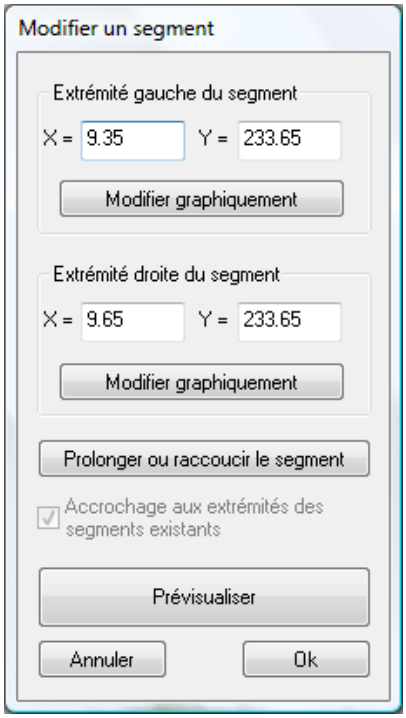


Figure 21 : Modification de segments

Mode opératoire :

a- Cliquer sur ce segment : les valeurs de ses coordonnées apparaissent dans la boîte de dialogue. Le curseur est rétabli dans son état normal et le segment se colorie en rouge.

b- Pour modifier le segment manuellement, entrer les nouvelles valeurs de ses coordonnées dans les cases correspondantes. Un aperçu du nouveau segment par rapport aux nouvelles données est disponible en cliquant sur le bouton « Prévisualiser ».
Nota : Si un segment est modifié, il se décroche des autres segments. Pour éviter de détacher deux segments, il faut modifier le point du profil.

c- Pour modifier le segment graphiquement cliquer sur le bouton respectif de chaque extrémité « Modifier graphiquement ». L'extrémité à modifier sera mobile et les coordonnées seront mises à jour en conséquence.
Le segment sera en rouge et un trait pointillé gris matérialise la distance entre l'ancienne et la nouvelle (pour chaque extrémité du segment). Si la case « Accrochage aux extrémités des segments existants » est activée, une flèche rouge se manifestera au voisinage d'une extrémité d'un segment préexistant.

d- Si les nouvelles valeurs du segment sont correctes, confirmer le choix en cliquant sur le bouton « OK », sinon cliquer sur « Annuler ».

3.3.6 *Prolonger ou raccourcir un segment*

Cette fenêtre est activée depuis le bouton « Prolonger ou raccourcir le segment », donc un segment doit être sélectionné au préalable. Cette option peut être utilisée dans le cas où la longueur d'un segment doit être modifiée sans pour autant en changer sa direction.

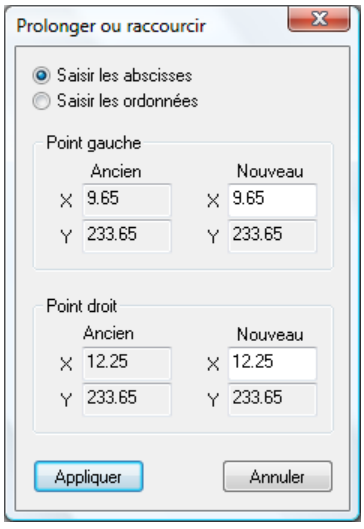


Figure 22 : Prolonger/Raccourcir un segment

Mode opératoire :

a- Choisir sur quelle extrémité (point gauche ou droit), le changement doit être effectué.

b- Entrer soit l'abscisse ou l'ordonnée du point. L'autre valeur sera calculée en conséquence.

c- Si les nouvelles valeurs sont satisfaisantes, cliquer sur « Appliquer », sinon répéter l'étape b.

d- Cliquer sur « Annuler » pour laisser intact le segment.

3.3.7 *Insérer un point sur un segment*

Il est possible d'insérer un point sur un segment préexistant afin de le scinder en 2 segments distincts pour accentuer une crête / un creux.

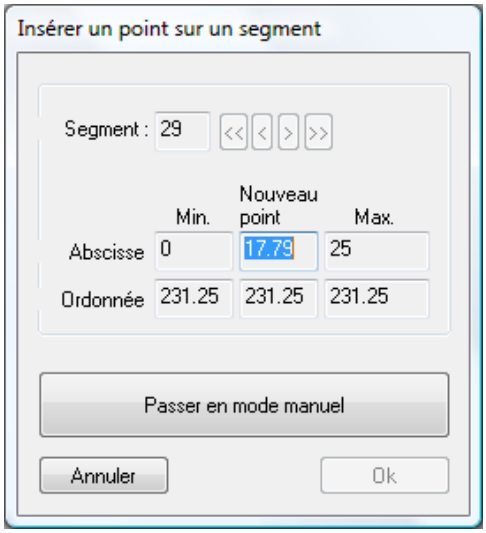


Figure 23 : Insertion d'un point

Mode opératoire :

a- Cliquer sur le bouton « Insérer un point » la fenêtre de la figure 23 apparaît. Une croix rouge apparaît également sur l'interface graphique et se déplace sur la chaîne de segments survolée en maintenant les données à jour. Un trait pointillé gris matérialise la distance entre le curseur de la souris et le point à insérer.

b- Lorsque les valeurs du nouveau point conviendront, cliquer sur le dessin.

c- Le bouton « Passer en mode manuel », permet de naviguer sur la chaîne de segments à l'aide de boutons fléchés.

Les coordonnées respectives de chaque segment parcouru sont signalées de manière à connaître l'intervalle en abscisse ou en ordonnée dans lequel le point doit être positionné.
Entrer une nouvelle valeur en abscisse ou ordonnée (l'autre valeur sera calculée automatiquement), cliquer sur le bouton « Prévisualiser ». Si les nouvelles valeurs saisies sont satisfaisantes, cliquer sur le bouton « OK » sinon, cliquer sur « Annuler ». La numérotation des segments tiendra compte de ce changement.

3.3.8 *Déplacer un point de la géométrie*

Il est possible de déplacer un point de la géométrie préexistante en cliquant sur le bouton « Déplacer un point de la géométrie », cette option permet de ne pas scinder deux segments, car ceux-ci restent accrochés. Lorsqu'un point sera survolé par le curseur de la souris, celui-ci sera entouré d'un cercle rouge, signifiant qu'il est possible d'en connaître les coordonnées et de les modifier.

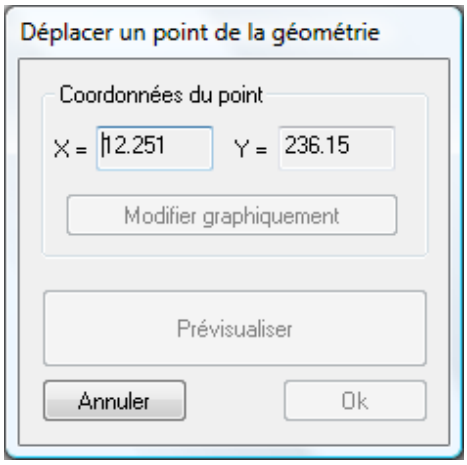


Figure 24 : Déplacer un point

Mode opératoire :

a- Cliquer sur le dessin lorsque le point est entouré du cercle rouge.

b- Ses coordonnées sont visibles. Les nouvelles valeurs peuvent alors être saisies. Cliquer sur le bouton « Prévisualiser » pour avoir un aperçu graphique des nouvelles valeurs.

c- Pour modifier ce point graphiquement, cliquer sur le bouton « Modifier graphiquement » : le point sera mobile et les segments impliqués seront en rouge. Les coordonnées de ce point seront mises à jour.

d- Pour finir, si ces valeurs sont correctes, cliquer sur « OK » sinon sur « Annuler ».

3.3.9 *Fusionner des points*

Dans le cas où deux extrémités de segments disjoints doivent être fusionnées, il faut cliquer sur le bouton « Fusionner des points ». Une boite de dialogue informe de la démarche à suivre. Un curseur spécifique permet une sélection rectangulaire est mis à disposition.

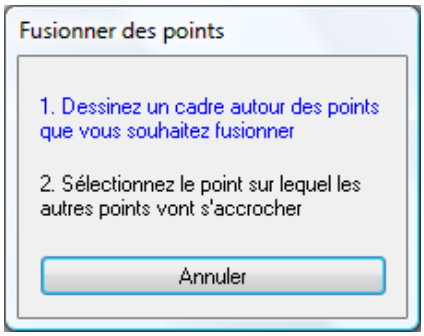

Fusionner des points
1. Dessinez un cadre autour des points que vous souhaitez fusionner
2. Sélectionnez le point sur lequel les autres points vont s'accrocher
Annuler

Figure 25 : Fusionner des points

Mode opératoire :

a- Tracer un rectangle en glissant - lâchant, de manière à englober les extrémités de segments concernées.

b- Si les points sont reconnus, ils sont respectivement mis en relief par une croix verte et la zone rectangulaire en question est agrandie. Un curseur en forme de carré noir se présente.
Si uniquement un seul point est inclus dans la sélection, un message d'erreur signalera qu'il faut recommencer la manipulation.

c- Parmi les points sélectionnés, matérialisés par des croix vertes, il faut choisir celui qui sera fixe.

Lorsque la souris est dans le voisinage du point désiré un cercle rouge surmonté d'une flèche rouge indiquera que la fusion est possible. Cliquer sur le dessin et la fusion s'effectuera. La zone d'affichage est rétablie dans sa totalité.

3.3.10 *Supprimer des points et/ou des segments*

La suppression d'un segment s'effectue via le menu « Saisie de la géométrie » présenté au paragraphe 3.3.1 précédent, en cliquant sur le bouton « Supprimer (points et segments)».
L'outil de suppression d'objet présent dans la barre d'outils peut également être utilisé.

Règles pratiques sur la saisie de la géométrie :

Il est possible d'atteindre une précision théorique de l'ordre du millimètre en modifiant le maillage de la grille. Cependant, cette précision ne peut être atteinte si le zoom est trop faible.

Lorsque deux segments se croisent, l'intersection est repérée et deux segments supplémentaires sont créés.

Le processeur de GEOSTAB n'accepte que les profils dont les segments sont ordonnés de gauche à droite et de haut en bas. Cette numérotation se fait automatiquement. Il peut arriver que des segments restent mal ordonnés : vérifier que le terrain naturel est bien défini sur tout le profil, ou qu'un segment n'est pas disposé comme indiqué ci-dessous :

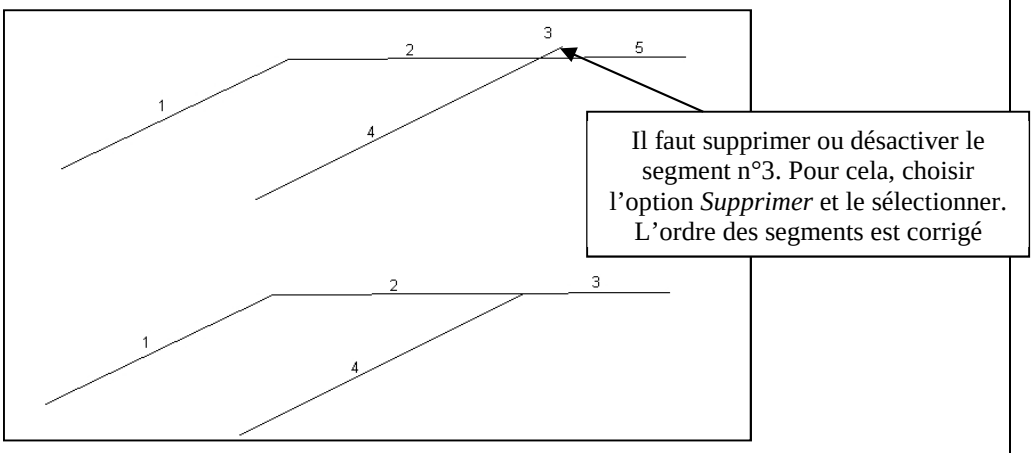


Figure 26 : Intersection du TN

Les abscisses et altitudes des points sont positives. Si tel n'est pas le cas, utiliser l'outil « Translater le profil » en cliquant sur le bouton « Transformer le profil » du menu « Outils ».

La géométrie doit être orientée avec le sommet du talus à droite.

3.4 Gestion des sols

Pour cela il faut choisir l'option « Gestion des sols » du menu « Préparation des données », la boîte de dialogue représentée sur la figure suivante apparaît.
L'utilisateur a la possibilité de créer, de supprimer des sols et de les associer à un ou plusieurs segments.
Le nombre de sols admissible au maximum est au nombre de 30.

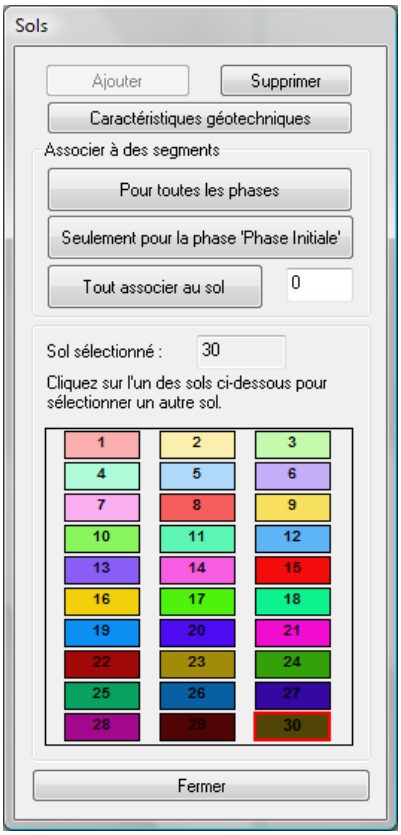


Figure 27 : Caractéristiques des sols

3.4.1 *Ajouter un sol*

En cliquant sur le bouton « Ajouter », la prochaine trame de sol sera activée provisoirement et le numéro de sol s'incrémente au fur à mesure.
Le numéro est affecté mais les caractéristiques géotechniques de ce sol n'ont pas encore été définies (voir en 3.4.3).

3.4.2 *Supprimer un sol*

En sélectionnant le sol puis en cliquant sur le bouton « Supprimer », le numéro de sol et sa trame seront non seulement effacés, mais aussi ses caractéristiques géotechniques dans le cas où elles auraient été définies antérieurement.

Si d'autres sols ont été définis avec des numéros supérieurs à celui du sol supprimé, leurs numéros seront décalés.

3.4.3 *Saisie des caractéristiques géotechniques des sols*

Choisir l'option « Caractéristiques géotechniques ». L'utilisateur doit remplir les caractéristiques de chaque sol impliqué dans le calcul.

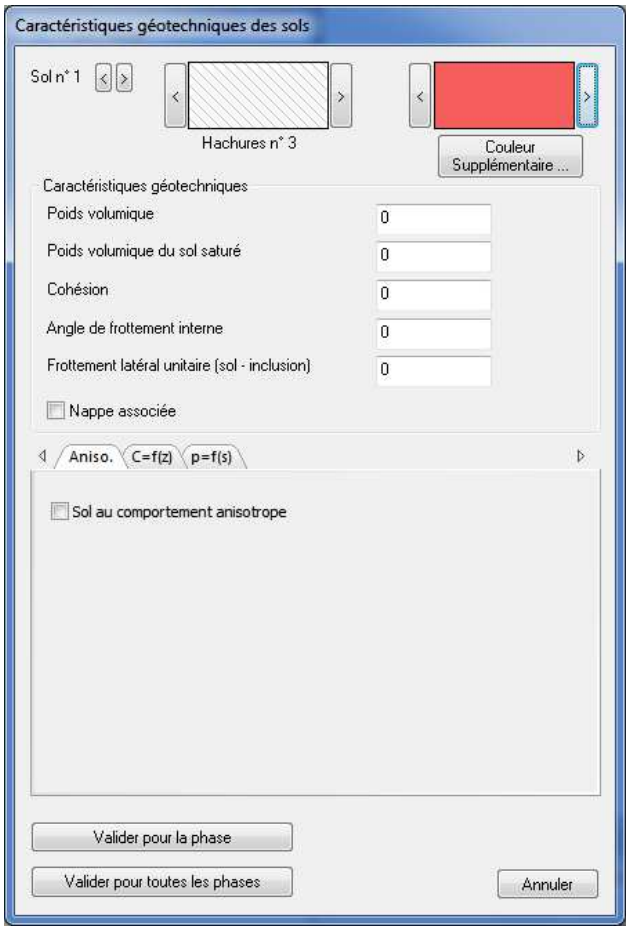


Figure 28 : Caractéristiques des sols

Cette fenêtre permet de configurer les caractéristiques de chacun des sols. Les flèches de navigation situées à côté du numéro de sol permettent de naviguer d'un sol à un autre.

L'utilisateur peut définir le type de figurés et/ou de couleurs, (utilisation les flèches de navigation situées de part et d'autre de la (ou des) trame(s) pour changer le figuré ou la couleur).

Pour chaque sol les paramètres géotechniques suivants doivent être entrés :

- Poids volumique du sol humide $\gamma_{h,}$ Ce poids volumique est utilisé pour les sols hors nappe.
- Poids volumique du sol saturé $\gamma_{sat,}$ Ce poids volumique, auquel on retranche le poids volumique de l'eau défini par ailleurs, est utilisé pour les sols sous nappe.
- Cohésion c' ou $c_{u,}$
- Angle de frottement φ' ou $\varphi_{u,}$
- Frottement latéral unitaire limite (sol-inclusion) $q_{s.}$

Si une nappe traverse ce sol, elle doit y être associée à ce sol et il faut donc cocher la case « Nappe associée », et attribuer le numéro de nappe correspondant.

Enfin cette fenêtre présente 3 onglets permettant une configuration plus avancée :

- comportement anisotrope,
- variation de la cohésion avec la profondeur,
- variation de l'angle de frottement avec la profondeur.

Ces options sont développées dans les paragraphes suivants.

Toutes ces caractéristiques peuvent être validées pour la phase courante, en cliquant sur le bouton « Valider pour la phase », ou pour toutes les phases, en cliquant sur le bouton « Valider pour toutes les phases»,
Les caractéristiques géotechniques et les unités correspondantes à fournir sont résumées ci-dessous.

Désignation	Symbole	unité SI
Poids Volumique du sol humide	γ_h	kN/m^3
Poids Volumique du sol saturé	γ_{sat}	kN/m^3
Cohésion	c	kN/m^2
Angle de frottement interne	φ	degrés
Frottement latéral unitaire limite entre le sol et l'inclusion	q_s	kN/m^2
N° de la nappe s'exerçant sur le sol	N°nappe	-

Tableau 1 : Sols – Données et unités

3.4.4 *Saisie de sols au comportement anisotrope*

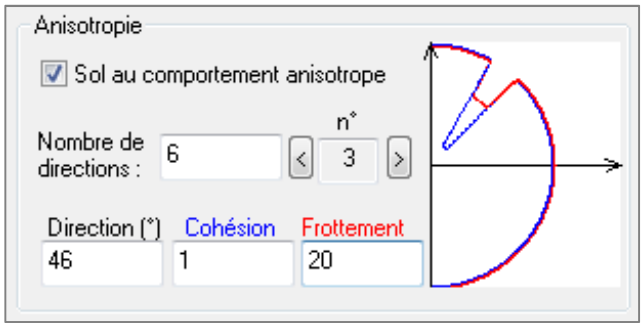


Figure 29 : Définition de l'anisotropie

En cochant dans la fenêtre l'option « Sol au comportement anisotrope » depuis l'onglet « Aniso. », d'autres options sont affichées. L'utilisateur doit saisir les valeurs suivantes pour chaque direction d'anisotropie pour le sol choisi : la direction, la cohésion et le frottement.

Pour les sols au comportement anisotrope, l'utilisateur doit saisir au minimum 2 directions.

Celles-ci doivent être classées par ordre croissant (entre –90 et 90°).

La première direction est forcément –90° et la dernière direction est forcément 90°.

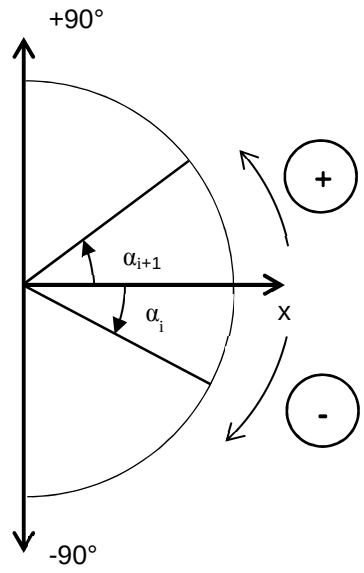


Figure 30 : Directions d'anisotropie

Par exemple pour obtenir le graphique de la figure 29 précédente il faut entrer dans l'ordre les valeurs suivantes. Chaque ligne doit être validée par un clic les flèches de navigation.

N° Direction	Angle (°)	Cohésion (kPa)	Frottement (°)
1	-90	10	30
2	45	10	30
3	46	1	20
4	54	1	20
5	55	10	30
6	90	10	30

Tableau 2 : Caractéristiques - Anisotropie

Le comportement du sol est obtenu par une interpolation linéaire basée sur l'inclinaison de la surface de rupture au point étudié et sur les données précédemment définies.

Il s'agit d'une modélisation généralement adaptée aux calculs de talus rocheux, où la rupture se produit dans les plans de fissurations (modèle de surfaces de ruptures par surfaces planes).

La figure suivante montre que les résultats des recherches des surfaces de rupture les plus critiques vont se trouver dans le faisceau dans lequel les caractéristiques sont plus faibles, et ce notamment en modélisation de ruptures par plans (cf. paragraphe 3.10.3).

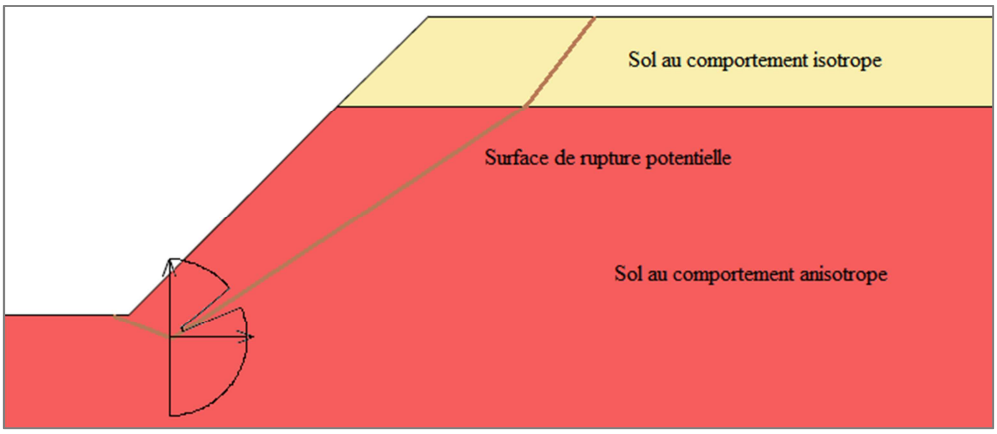


Figure 31 : Modélisation de l'anisotropie

3.4.5 *Variation de la cohésion en fonction de la profondeur*

Les calculs courants de stabilité imposent de définir des sols de caractéristiques homogènes. Pourtant, sur le terrain, un même sol peut avoir des caractéristiques variant avec la profondeur. Certaines modélisations, comme par exemple la prise en compte de caractéristiques plus faibles à des faibles profondeurs (liée aux cycles de gel / dégel) imposent de prendre en compte une variation de cohésion en fonction de la profondeur dans le sol. Pour prendre en compte ce phénomène, cocher la case « Cohésion varie en fonction de la profondeur » sous l'onglet « c = f(z) »

Cette option est incompatible avec la prise en compte de l'anisotropie.

Entrer pour chaque couple « Profondeur » ; « Cohésion » les valeurs voulues. Vous pouvez passer d'une valeur à une autre par la touche Entrée, Tabulation, ou encore par les touches directionnelles.

Le graphique traçant la modélisation retenue s'affiche et se met à jour automatiquement.

Pour supprimer un couple de valeurs, sélectionner son numéro et cliquer sur le bouton « Supprimer ». Cliquer sur le bouton « Tout effacer » pour supprimer l'ensemble des valeurs entrées.

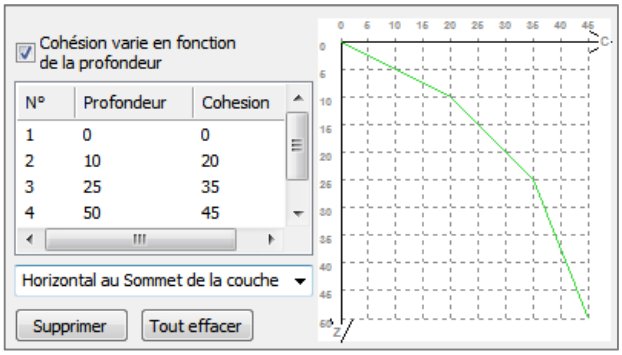


Figure 32 : Variation de la cohésion

La modélisation peut se faire suivant l'une ou l'autre des configurations décrites ci-dessous :

« Horizontal au sommet de la couche », c'est-à-dire que la profondeur nulle se situe au niveau du point qui possède l'ordonnée la plus grande et sous lequel est situé le sol concerné.

« Parallèle au toit de la couche », c'est-à-dire que la profondeur nulle suit les segments définissant le toit de la couche de sol concerné.

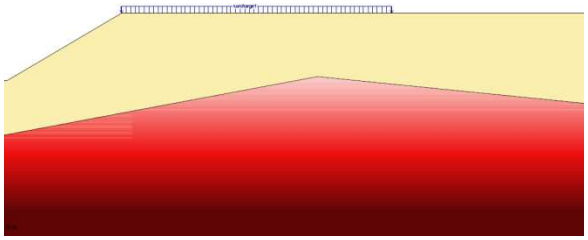


Figure 33 : Configuration « Horizontal au sommet de la couche »

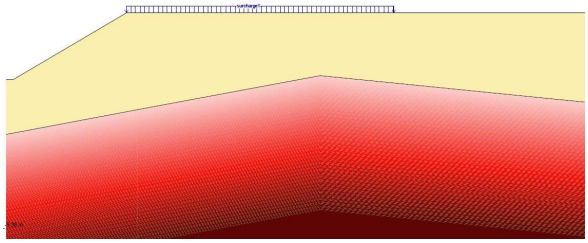


Figure 34 : Configuration « Parallèle au toit de la couche »

3.4.6 *Variation de l'angle de frottement interne en fonction de la pression de couverture*

Pour des faibles épaisseurs de couverture, et notamment pour le calcul des cercles de peau, ou encore pour des sols soumis au cycle gel/dégel, il s'avère que l'angle de frottement interne à faible contrainte est supérieur à l'angle de frottement déterminé classiquement (critère théorique de Mohr-Coulomb, cf. Figure 35 ci-dessous).

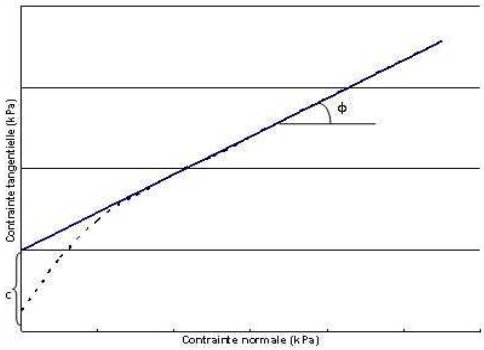


Figure 35 : Critère théorique Mohr-Coulomb

La modélisation d'un tel sol est possible en cochant la case « Angle de frottement varie en fonction de la pression » sous l'onglet « p = f(s) ». Cette option est incompatible avec la prise en compte de l'anisotropie.

Dans les caractéristiques géotechniques des sols, onglet « p=f(s) », cocher la case « Angle de frottement varie en fonction de la pression »

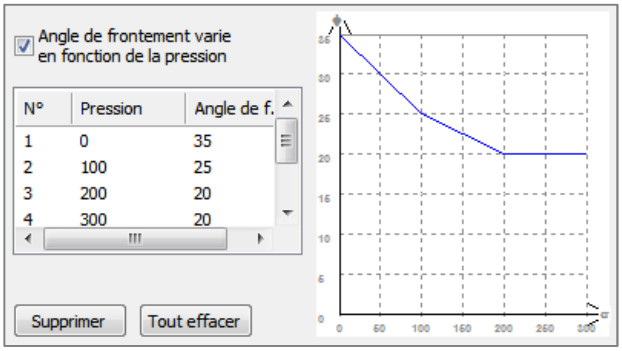


Figure 36 : Variation de l'angle de frottement

Entrer pour chaque couple « Pression » ; « Angle de frottement » les valeurs voulues. Vous pouvez passer d'une valeur à une autre par la touche Entrée, Tabulation, ou encore par les touches directionnelles.

Le graphique traçant la modélisation retenue s'affiche et se met à jour automatiquement.

Pour supprimer un couple de valeurs, sélectionner son numéro et cliquer sur le bouton « Supprimer ». Cliquer sur le bouton « Tout effacer » pour supprimer l'ensemble des valeurs entrées.

3.4.7 *Attribution d'un sol à un segment*

Pour attribuer un sol à un ou plusieurs segments, dans la section « Associer à des segments », cliquer sur le bouton « Pour toutes les phases » pour associer le sol aux segments pur toutes les phases ou « Seulement pour la phase 'XXX' » pour associer le sol aux segments pour la phase courante.

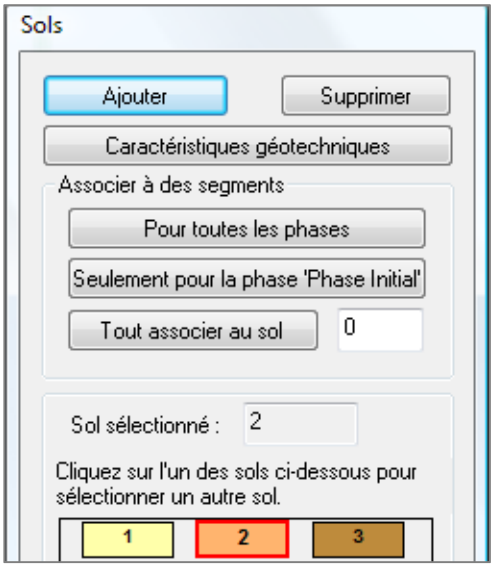


Figure 37 : Association des sols

Mode opératoire :

a- Commencer par cliquer sur la trame du sol correspondant dans la boîte de dialogue. Celle-ci est alors mise en relief par un rectangle rouge.

b- Un curseur en forme de pinceau accompagné d'une flèche se présente. Quand le curseur survolera chaque segment, ce dernier sera coloré en rouge. Cliquer sur le ou les segments que doivent être associés à ce sol. La trame s'affiche sous le segment en question.

c- Répéter les actions a à b. Lorsque les associations seront faites, clôturer cette procédure en cliquant sur le bouton « Fin de l'association ».

d-Quand le curseur passe sous un groupe de segments continus, chaque segment se colore en rouge. Cliquer dans la surface située sous le groupe pour associer le sol pour l'ensemble des segments du groupe (cf. figure ci-dessous).

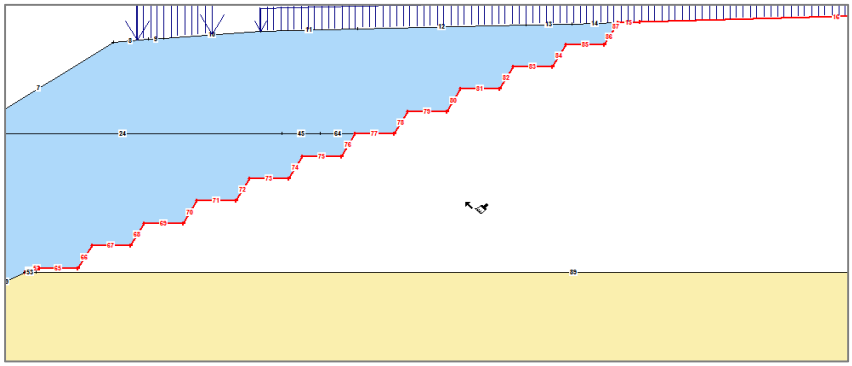


Figure 38 : Association à un groupe de segments

Pour vérifier la pertinence des associations qui ont été effectuées, il suffit de survoler chaque trame de sol de la boîte de dialogue pour constater que la trame apparaît en surbrillance rouge dans le dessin : on peut alors vérifier qu'elle est bien dessinée sous le ou les segments en question.

Il est également possible d'associer un même sol à tous les segments du profil en appuyant sur le bouton « Tout associer au sol ». Le sol associé est celui dont le numéro figure dans la case directement à droite de ce bouton.

3.5 Saisie des conditions d'eau

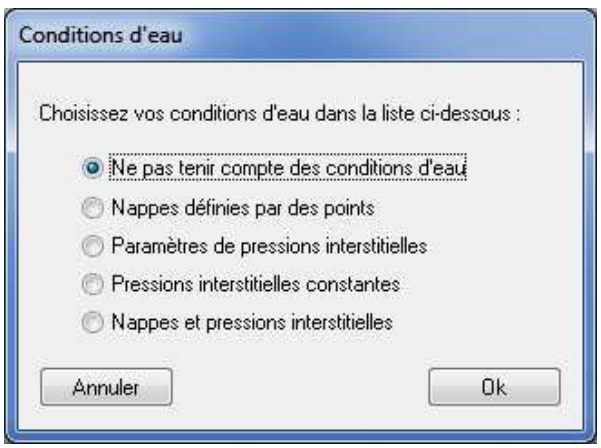

Conditions d'eau
Choisissez vos conditions d'eau dans la liste ci-dessous :
Ne pas tenir compte des conditions d'eau
Nappes définies par des points
Paramètres de pressions interstitielles
Pressions interstitielles constantes
Nappes et pressions interstitielles
Annuler
Ok

Figure 39 : Saisie des conditions d'eau

Pour choisir le modèle de conditions d'eau, il faut sélectionner une option du menu « Préparation des données », puis « Conditions d'eau (modèle) ».
La boîte de dialogue reproduite ci-contre apparaît. L'ensemble des conditions d'eau sera défini de la même façon pour une phase donnée.

Note : Pour modifier les conditions d'eau, il faut sélectionner l'option du menu « Préparation des données », puis « Modifier les conditions d'eau ». Si aucune nappe n'est présente, la fenêtre ci-contre sera ouverte.

3.5.1 *Saisie d'une nappe définie par des points*

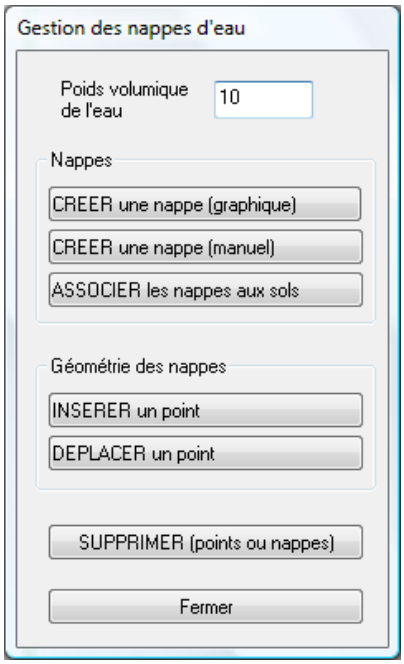


Figure 40 : Gestion des nappes

Si l'utilisateur choisit l'option « Nappes définies par des points », la boite de dialogue ci-contre apparaît. L'utilisateur dispose des mêmes modes de saisie que celles utilisées en saisissant le profil (Outils de création graphique ou manuelle ; insertion, déplacement ou suppression de points).

En manuel :
Les coordonnées (X,Y) des points courants sont entrées successivement de manière analogue aux segments.
Les ordonnées des points extrêmes sont entrées séparément.
Un message d'erreur apparaît dans le cas d'une intersection avec une autre nappe.

En graphique :
Les ordonnées des points extrêmes sont définies en premier.
Les points courants sont définis ensuite par clics successifs

Cependant, certaines opérations ne sont pas possibles :

- une nappe ne peut déborder latéralement du terrain naturel défini (les bords de la nappe fixés en X);
- une nappe doit être continue d'un bout à l'autre du profil ;
- il peut exister des intersections segments de nappes / segments de profil.

La nappe doit être définie par des points ordonnés de gauche à droite et couvrir la zone de développement potentiel des surfaces de ruptures pour pouvoir être prise en compte. La ligne reliant ces points peut passer dans un sol au-dessus d'un sol ainsi qu'au-dessus du terrain naturel.

Le logiciel gère automatiquement les nappes extérieures, en tenant compte de l'effet « poids » de l'eau. Cette option ne considère pas les gradients hydrauliques et tient compte uniquement de la colonne d'eau pour chaque tranche.

Notes :
La pression interstitielle à la base de chaque tranche est égale au poids unitaire de l'eau, multiplié par la différence de hauteur entre la base de la tranche et le niveau de la nappe quand cette dernière est située au-dessus de la base, même si la nappe est au-dessus du terrain naturel.
En cas de nappe au-dessus du terrain naturel, isolée de ce dernier par une étanchéité (cas de digues, par exemple), il faut rentrer l'effet de nappe extérieure par une surcharge extérieure, perpendiculaire au terrain naturel et dont l'intensité est égale à la pression hydrostatique.

3.5.1.1 Créer une nappe (graphique)

Il faut cliquer sur le bouton « Créer une nappe (graphique) » et valider par « OK ». Une nouvelle fenêtre s'active (ci-dessous) et une croix bleue se présente sur la zone de travail (à l'abscisse gauche limite du profil) afin de commencer la saisie. Elle est prolongée d'un axe horizontal en pointillés symbolisant la distance entre la croix et la position actuelle du curseur.

Remarque : lorsque du déplacement du curseur en hauteur, la position relative de l'altitude gauche s'inscrit dans cette boîte de dialogue.

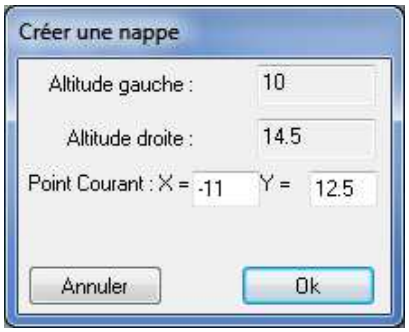


Figure 41 : Création nappe graphique

Mode opératoire :

a- Cliquer pour prendre en compte ce point de nappe.

b- Un segment bleu en pointillés se dessine en prenant comme point de départ le point de nappe précédemment saisi. Il ne reste plus qu'à saisir l'altitude droite de la nappe correspondant à l'abscisse limite droite du profil en faisant varier l'ordonnée de la croix bleue. Cliquer à nouveau.

c- La nappe ainsi créée est numérotée et le centre du segment bleu est accompagné du symbole de nappe.

d- Pour saisir les extrémités de la nappe manuellement, il faut cliquer sur le bouton « Passer en mode manuel » avant la partie c- du mode opératoire décrit précédemment. Commencer par saisir les altitudes de la nappe. Cliquer sur le bouton « Pré visualiser » pour avoir un aperçu graphique de votre saisie. Si ces valeurs sont correctes, cliquer sur le bouton « OK » ou sur « Annuler ».

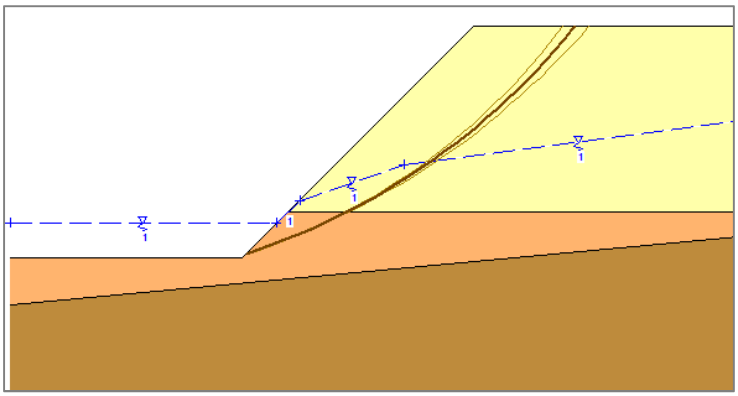


Figure 42 : Visualisation d'une nappe définie point par point dans la fenêtre de résultats

3.5.1.2 *Créer une nappe (manuel)*

Il faut cliquer sur le bouton Créer une nappe (manuel) » et valider par « OK ».
Une nouvelle fenêtre s'active (cf. figure suivante).

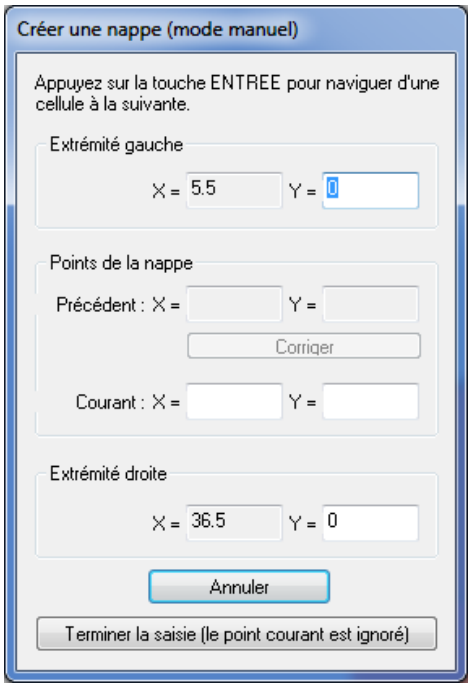


Figure 43 : Création de nappe manuelle

Mode opératoire :

a- Commencer par entrer la valeur y (l'altitude) de l'extrémité gauche du segment général de la nappe. Appuyer sur la touche « Entrée » pour valider cette valeur.

b- A ce stade, il est possible de saisir les points intermédiaires de la nappe en entrant le couple de valeurs (x, y). Appuyer sur la touche « Entrée » pour valider le point courant de nappe. Si ce point devait être modifié, cliquer sur le bouton « Corriger » situé sous les coordonnées du dernier point saisi (Zone du point « précédent »). Entrer les nouvelles valeurs de ce point et valider par la touche « Entrée ». Il s'agit de la même méthodologie que lors de la création de segments en mode manuel.

c- Répéter l'action b pour chaque point de nappe intermédiaire.

d- Une fois que le dernier point intermédiaire est validé. Entrer la valeur de l'altitude droite limite de la nappe et cliquer sur le bouton « Terminer la saisie ». La nappe ainsi saisie se retrouve dessinée sur la zone de travail.

3.5.1.3 *Associer les nappes aux sols*

Pour associer des nappes aux sols préalablement définis (et affectés à des segments de profil), il faut cliquer sur le bouton option « Associer les nappes aux sols ». La boîte de dialogue ci-dessous se présente sur la zone de travail. Associer une nappe à un sol permet de considérer l'effet de l'eau dans le sol considéré.

Le curseur est représenté sous la forme du symbole de nappe accompagné d'une flèche de pointage. Lorsque le curseur survolera une trame de sol, la trame sera colorée en rouge signifiant que ce sol peut être affecté par la nappe. Des aires colorées en bleu clair sous-jacentes aux segments de nappe signifient qu'une ou plusieurs associations sols/nappes ont été effectuées. Les numéros de sols affectés par cette nappe s'inscrivent dans la boîte de dialogue.

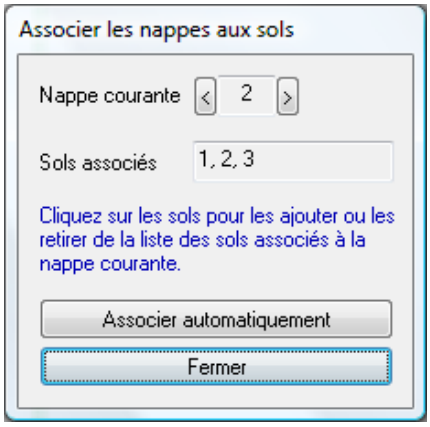

Associer les nappes aux sols
Nappe courante
2
Sols associés
1, 2, 3
Cliquez sur les sols pour les ajouter ou les retirer de la liste des sols associés à la nappe courante.
Associer automatiquement
Fermer

Figure 44 : Association des nappes

Mode opératoire :

a- Choisir sur quelle nappe les associations doivent être établies (si le problème en compte plusieurs) en la sélectionnant avec les boutons < et >.

b- Survoler une trame de sol. Lorsqu'elle sera colorée en rouge, cliquer pour réaliser l'association. Le numéro du sol (symbolisé par cette trame) s'inscrira dans la zone de sols associés (et s'ajoutera à d'autres numéros de sols présents). Cette association est symbolisée par une aire colorée en bleu clair sous-jacente aux segments de nappe courant.

c- Pour désassocier un sol à une nappe, survoler l'aire colorée en bleu clair. L'aire s'assombrit, cliquer et l'association sera rompue. L'aire en bleu clair laisse place à la trame de sol en surbrillance en attente d'association.

d- Répéter les actions a et b si le profil comporte plusieurs sols et nappes définis et des associations sur plusieurs nappes doivent être créées. Le bouton « Associer automatiquement » associe automatiquement tous les sols présents en dessous de la nappe sélectionnée.

Afin de vérifier les associations sols / nappes, consulter les caractéristiques géotechniques de chaque sol associé à une nappe depuis l'option « Gestion des sols » disponible dans le menu « Préparation des données » : la case « Nappe associée » doit être cochée et le numéro de la nappe doit être renseigné.

3.5.1.4 *Insérer un point (de nappe)*

Pour insérer un point supplémentaire sur une nappe (présente), cliquer sur l'option « Insérer un point ». La boîte de dialogue ci-dessous se présente et une croix bleue surmontée d'un axe vertical en pointillés parcourt le ou les segments des nappes présentes.

Si le fichier comporte plusieurs nappes, le curseur se positionne sur la nappe la plus proche en mettant à jour le numéro de nappe dans la boîte de dialogue et l'abscisse du point à placer.

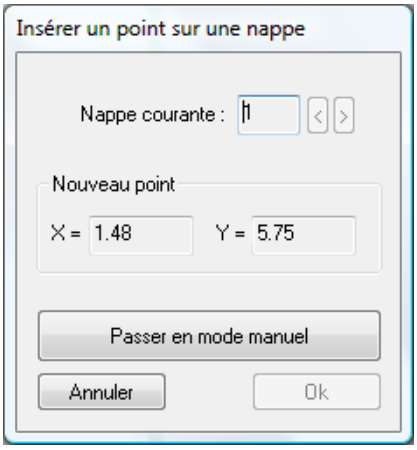


Figure 45 : Nappe - Insertion d'un point

Mode opératoire :

a- Déplacer le curseur de nappe en nappe si plusieurs nappes sont présentes.

b- Parcourir les segments de la nappe choisie jusqu'à atteindre l'abscisse désirée. Cliquer pour valider la valeur retenue.

c- Répéter l'action b (voire l'action a) pour autant de points à rajouter sur une ou plusieurs nappes. Le segment de nappe contenant ce point se scindera en deux autres segments ayant pour extrémité commune ce point.

d- Pour insérer un point de nappe manuellement, il faut cliquer sur le bouton « Passer en mode manuel ». Commencer par sélectionner le numéro de nappe (si le profil en compte plusieurs) à l'aide des boutons < et >. Entrer l'abscisse de ce point de nappe. Son ordonnée sera automatiquement calculée. Cliquer sur le bouton « Pré visualiser » pour avoir un aperçu graphique de la saisie. Si ces valeurs sont correctes, cliquer sur le bouton « OK » ou sur « Annuler ».

3.5.1.5 *Déplacer un point (de nappe)*

Pour déplacer un point sur une nappe, cliquer sur l'option « Déplacer un point ». La boîte de dialogue ci-dessous se présente accompagnée d'un curseur carré en attente d'une sélection d'un point de la nappe. Lorsque le curseur sera voisinage d'un point de nappe, celui-ci sera entouré d'un cercle bleu, signifiant qu'il est sélectionnable.

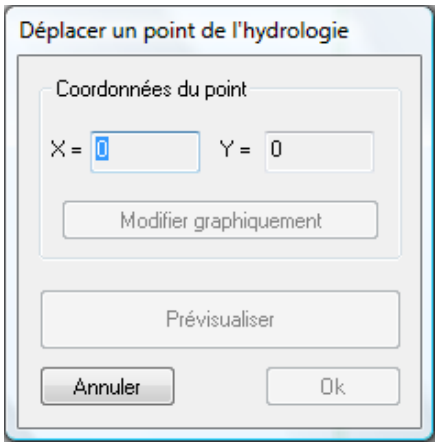


Figure 46 : Nappe – Déplacer un point

Mode opératoire :

a- Placer le curseur au voisinage du point de nappe à déplacer. Cliquer sur ce point. Les coordonnées de ce point s'inscrivent dans la boîte de dialogue et sont modifiables.

b- Pour modifier ce point graphiquement, cliquer sur le bouton « Modifier graphiquement » : le point de nappe devient mobile. Un trait en pointillé symbolise la distance entre l'ancien point et le nouveau point. Cliquer lorsque les nouvelles coordonnées sont correctes.

c- Pour modifier les coordonnées de ce point manuellement, sélectionner respectivement chacune des coordonnées et attribuer une nouvelle valeur. Cliquer sur le bouton « Pré visualiser » pour avoir un aperçu du nouveau tracé de la nappe sinon cliquer sur « Annuler ».

Les segments de nappe sont automatiquement mis à jour lorsque les actions a ou b sont effectuées, c'est-à-dire autant de fois qu'il y a de points à modifier.

3.5.1.6 *Supprimer (points ou nappes)*

La suppression de points ou nappes s'effectue via le menu « Gestion des nappes d'eau » présenté précédemment (cf. figure 40), en cliquant sur le bouton « Supprimer (points ou nappes) ».
L'outil de suppression d'objet présent dans la barre d'outils peut également être utilisé.

3.5.2 *La gestion des nappes/phases :*

Pour une phase donnée, si les conditions d'eau sont différentes, il faut créer une nouvelle nappe. Il faut alors penser à désactiver les nappes des phases précédentes.

3.5.3 *Paramètre de pression interstitielle r_u*

GEOSTAB propose également la prise en compte des conditions d'eau par l'intermédiaire des pressions interstitielles.

Pour saisir les paramètres de pression interstitielle pour chaque sol défini dans votre fichier cliquer sur l'option « Paramètres de pression interstitielles ». La boîte de dialogue ci-dessous apparaît :

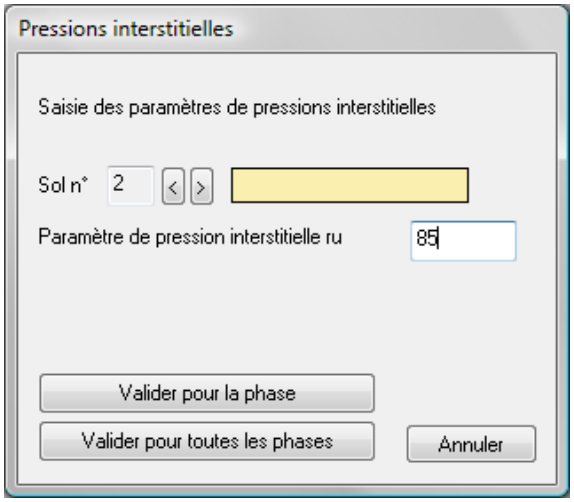


Figure 47 : Définition des pressions interstitielles

Mode opératoire :

a- Sélectionner le numéro de sol défini au sein du fichier, en cliquant sur les boutons < et >. La trame du sol en question s'affichera.

b- Saisir la valeur du paramètre de pression pour le sol choisi.

c- Répéter les actions a et b autant de fois qu'il y a de sols définis et affectés par un paramètre de pression interstitielle. Valider cette procédure en cliquant sur le bouton « Valider pour la phase » ou « valider pour toutes les phases » sinon cliquer sur « Annuler ».
La pression interstitielle est calculée selon la formulation suivante :

$$u = \sigma_v \times r_u$$

avec σ_v : contrainte verticale totale

3.5.3.1 *Pression interstitielle constante (u)*

Pour saisir une pression interstitielle constante pour chaque sol défini dans votre fichier il faut cliquer sur l'option « Pressions interstitielles constantes ». La boîte de dialogue ci-dessous apparaît :

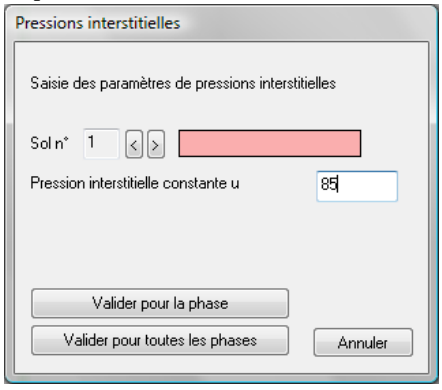


Figure 48 : Définitions pressions constantes

Mode opératoire :

a- Sélectionner le numéro de sol défini au sein du fichier, en cliquant sur les boutons < et >. La trame du sol en question s'affichera.

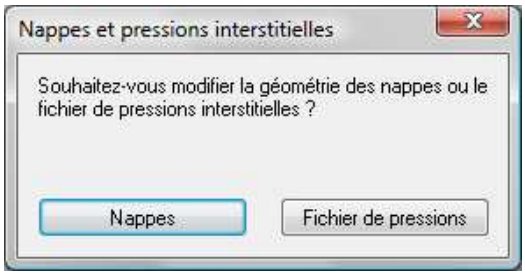
b- Saisir la valeur de la pression interstitielle constante pour le sol choisi.

c- Répéter les actions a et b autant de fois qu'il y a de sols définis et affectés par une pression interstitielle constante. Valider cette procédure en cliquant sur le bouton « Valider pour la phase » ou « valider pour toutes les phases » sinon cliquer sur « Annuler ».

3.5.3.2 Nappes et fichier de pressions interstitielles

Cette option permet de prendre en compte une série de données importées correspondant à des pressions interstitielles selon un maillage dans le plan (x, y) du profil. La nappe permet de définir l'isobare u = 0.

La boîte de dialogue ci-dessous apparaît :


Nappes et pressions interstitielles
Souhaitez-vous modifier la géométrie des nappes ou le fichier de pressions interstitielles ?
Nappes
Fichier de pressions

L'utilisateur est invité à travailler soit sur la géométrie des nappes, soit sur le fichier de pression interstitielle associé.

Dans le premier cas il est dirigé vers la boîte de dialogue décrite en 3.5.1 (Gestion des nappes).

Dans le second cas, il est dirigé vers la boîte de dialogue de la figure 49 suivante.

L'utilisateur peut définir les conditions d'eau par l'intermédiaire d'un fichier de pressions interstitielles issu d'un programme de calcul d'écoulement par différences finies ou éléments finis.

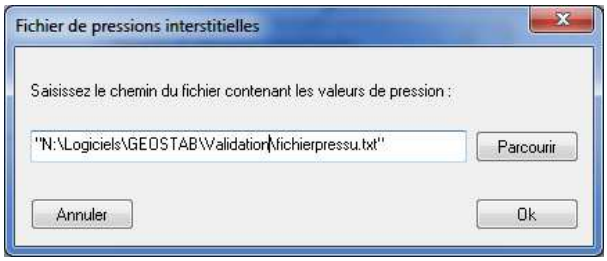
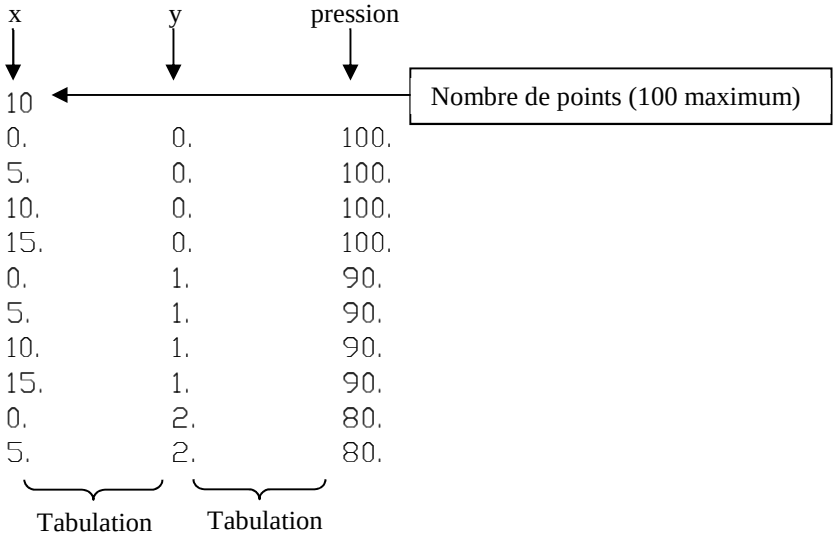


Figure 49 : Sélection du fichier de pressions interstitielles

Choisir le fichier de pression interstitielle en cliquant sur le bouton « Parcourir ». la fenêtre invite à choisir un fichier texte d'extension « .txt ».

Vérifier que le nom du fichier soit entre guillemets
Valider en cliquant sur « Ok » ou sur « Annuler ».

Ce fichier doit être au format texte et devra respecter la mise en forme suivante :



Mise en forme (n = nombre de points)*:*
n
Abscisse point 1 [TAB] Ordonnée point 1 [TAB] Valeur de pression 1
Abscisse point 2 [TAB] Ordonnée point 2 [TAB] Valeur de pression 2
[…]
Abscisse point n [TAB] Ordonnée point n [TAB] Valeur de pression n

Remarque :
Dans ce cas, la pression interstitielle à la base de chaque tranche est calculée par interpolation à partir des points les plus proches et de l'isobare u = 0. La pression calculée sera d'autant plus précise que le maillage sera « serré ».

3.6 Saisie des charges

Pour saisir une charge, sélectionner l'option « Charges » du menu « Préparation des données ». Une boîte de dialogue se présente et propose de choisir la saisie d'une surcharge ou d'une force linéaire.

3.6.1 *Saisie des surcharges*

Pour saisir une surcharge (i.e. force répartie), cliquer sur le bouton « Surcharge ». Le curseur prend la forme d'un poids, accompagné d'un axe vertical en pointillés en attente sur la zone de travail. Une surcharge par défaut est apparente. Elle est mobile suivant la position de l'axe.

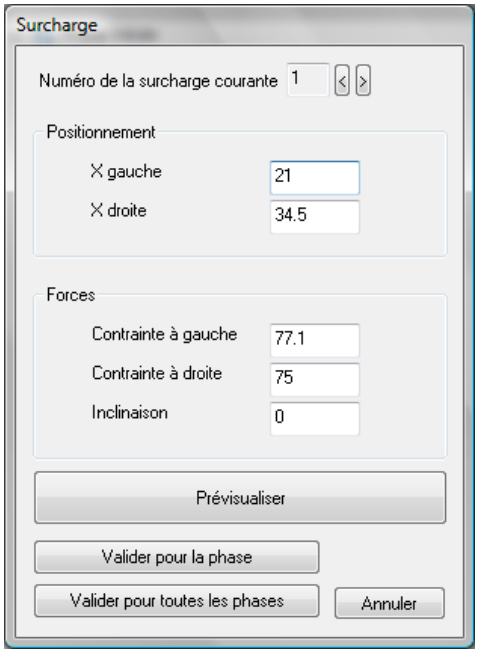


Figure 50 : Saisie d'une surcharge

Mode opératoire :

a- Déplacer le curseur vers la gauche ou vers la droite pour déplacer la ligne verticale et cliquer pour saisir la valeur X gauche.

b- Déplacer le curseur à la droite du X gauche établi et cliquer pour accepter la valeur X droite.

c- La ligne en pointillés devient alors horizontale. Déplacer le curseur à une hauteur plus élevée que le profil (sur laquelle repose la surcharge) pour saisir la contrainte à gauche. Répéter cette action pour la contrainte à droite.

d- Pour saisir l'inclinaison, l'axe se confond avec la direction d'application de la surcharge. Suivant le déplacement du curseur, la surcharge subit une inclinaison (ainsi que les traits composant sa trame). Cliquer pour saisir la valeur choisie.

Si les valeurs de la surcharge doivent être entrées manuellement, cliquer sur le bouton « Passer en mode manuel ». Il ne reste plus qu'à saisir dans chaque case les propriétés de la surcharge et à cliquer sur le bouton « Pré visualiser » pour un aperçu. Si le résultat de la saisie est correct, cliquer sur le bouton « Valider pour la phase » (la surcharge ne sera active que pour la phase en cours et les suivantes) ou sur le bouton « Valider pour toutes les phases » (la surcharge sera active pour toutes les phases), sinon sur « Annuler ».

La surcharge est alors représentée sur le profil :

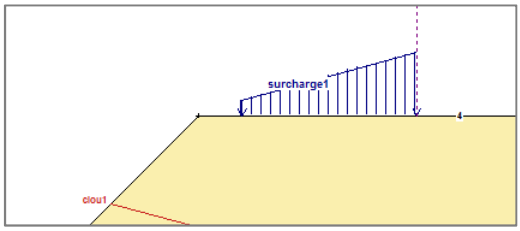


Figure 51 : Visualisation des surcharges

Lors de la modification d'une surcharge, le bouton « Valider pour toutes les phases » permet de modifier les contraintes gauche et droite, et l'inclinaison pour toutes les phases. Le bouton « Valider pour la phase » permet de modifier ces caractéristiques pour la phase en cours.

Remarques :
Les limites des surcharges peuvent englober plusieurs segments de celle-ci. Une surcharge est forcément sur un (ou plusieurs) segment(s) du TN.
Les inclinaisons sont repérées par rapport à la verticale et doivent être définies entre 180° et -180° avec une orientation positive dans le sens trigonométrique.

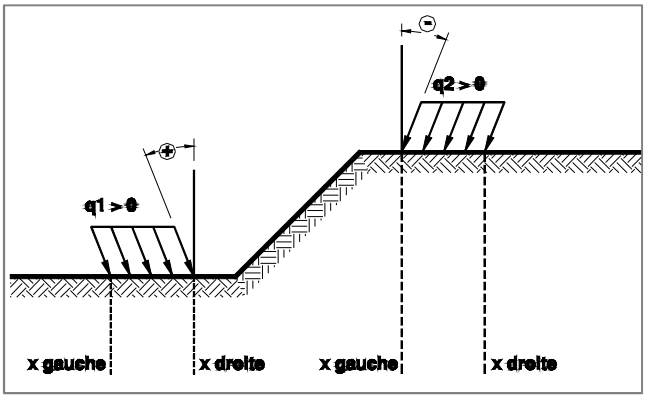


Figure 52 : Inclinaison des surcharges

Si une surcharge est associée à un segment qui doit être désactivé pour une autre phase, alors la surcharge s'appliquera au TN de la phase en question.

3.6.2 *Saisie des forces linéaires*

Pour saisir une force linéaire (i.e. force ponctuelle), cliquer sur le bouton « Force linéaire ». Une croix surmontée d'un « F » et accompagnée d'une petite flèche se présente. Une force linéaire par défaut est matérialisée à la même abscisse que la flèche, sous la forme d'un vecteur dirigé vers le bas et verticale. Ce vecteur est mobile suivant l'abscisse de la flèche.

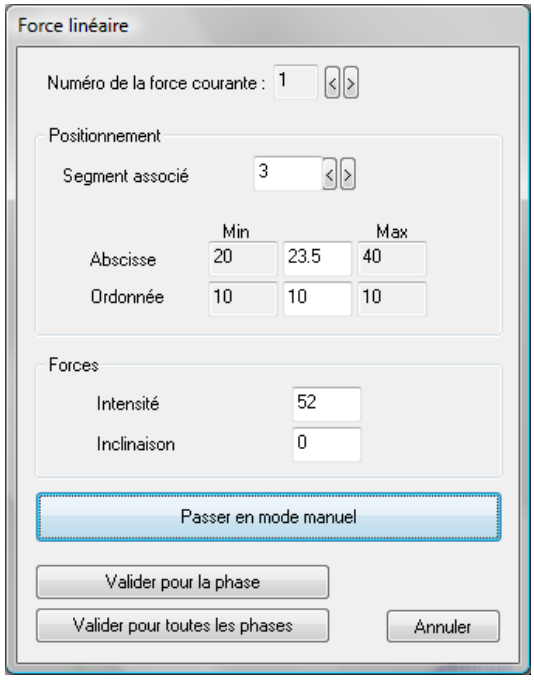


Figure 53 : Saisie d'une force linéaire

Mode opératoire :

a- Déplacer le réticule latéralement pour choisir à quelle abscisse s'exercera la force. Suivant le déplacement la boîte de dialogue renseigne sur les propriétés du segment sous-jacent supportant la force. Cliquer pour valider l'abscisse retenue.

b- Un axe en pointillés horizontal se présente et symbolise la valeur absolue définissable pour la force en question. Son déplacement est lié au déplacement du réticule. Déplacer le réticule à la hauteur désirée et cliquer pour valider l'intensité de la force.

c- Le point d'application étant fixé, la direction du vecteur de la force sur le segment du profil fait office d'axe angulaire pour saisir l'inclinaison. Déplacer le réticule vers le sens trigonométrique positif ou négatif et cliquer pour saisir la valeur de l'inclinaison retenue.

Si les valeurs de la force linéaire doivent être entrées manuellement, cliquer sur le bouton « Passer en mode manuel ». Il ne reste plus qu'à saisir dans chaque case les propriétés de la force linéaire et à cliquer sur le bouton « Pré visualiser » pour un aperçu. Si le résultat de la saisie est correcte, cliquer sur le bouton « Valider pour la phase » (la surcharge ne sera active que pour la phase courante) ou sur le bouton « Valider pour toutes les phases » (la surcharge sera active pour toutes les phases), sinon sur « Annuler ».
La force est alors représentée sur le profil :

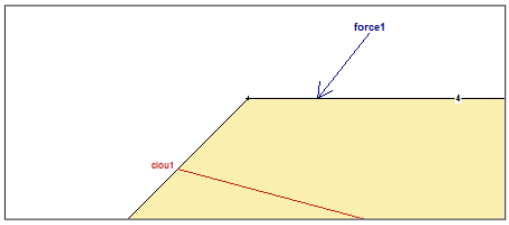


Figure 54 : Visualisation des forces linéaires

Remarques :
Le point d'application d'une force ne correspond pas forcément à un point du terrain naturel mais est obligatoirement positionné sur un segment. Si celui-ci vient à être désactivé pour d'autres phases, la force sera désactivée également.
Les inclinaisons sont repérées par rapport à la verticale et doivent être définies entre 180° et -180° avec une orientation positive dans le sens trigonométrique (cf. figure ci-dessous).

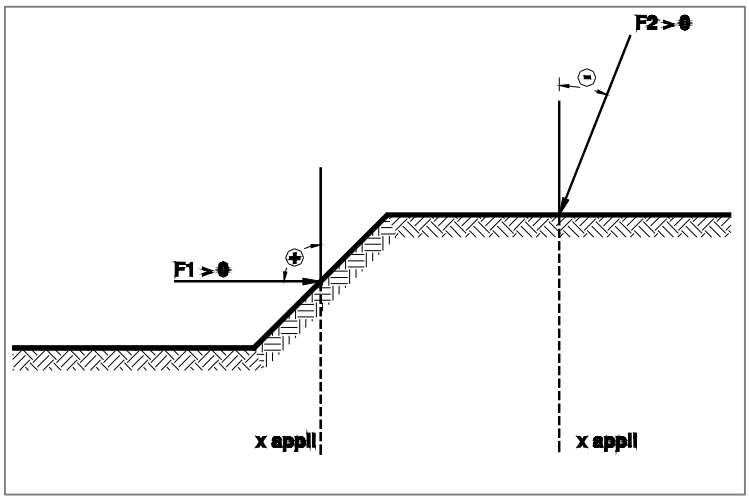


Figure 55 : Inclinaison des charges

3.7 Saisie des inclusions

Les inclusions sont des objets destinés à améliorer la stabilité. Pour saisir une inclusion, sélectionner l'option « Inclusions » du menu « Préparation des données ». La boîte de dialogue ci-dessous se présente.

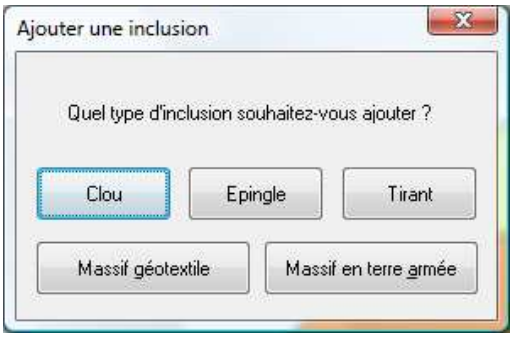


Figure 56 : Choix de l'inclusion

Vous avez le choix entre la saisie :
- d'un clou,
- d'une épingle,
- d'un tirant,
- d'un massif géotextile ou
- d'un massif en terre armée.

3.7.1 *Saisie d'un clou / d'une épingle (ancrages passifs)*

Pour la saisie d'un clou / d'une épingle, cliquer sur le bouton « Clou » ou sur le bouton « Epingle ».

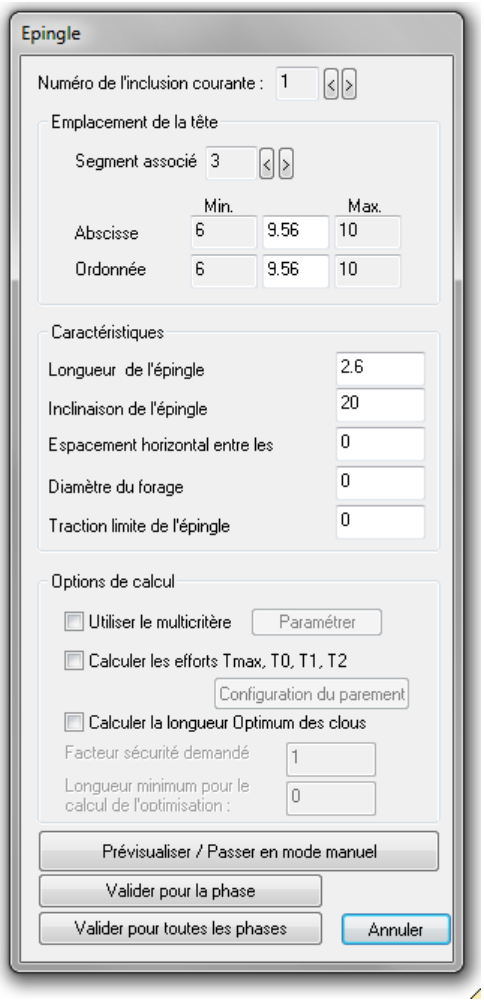


Figure 57 : Insertion d'une épingle

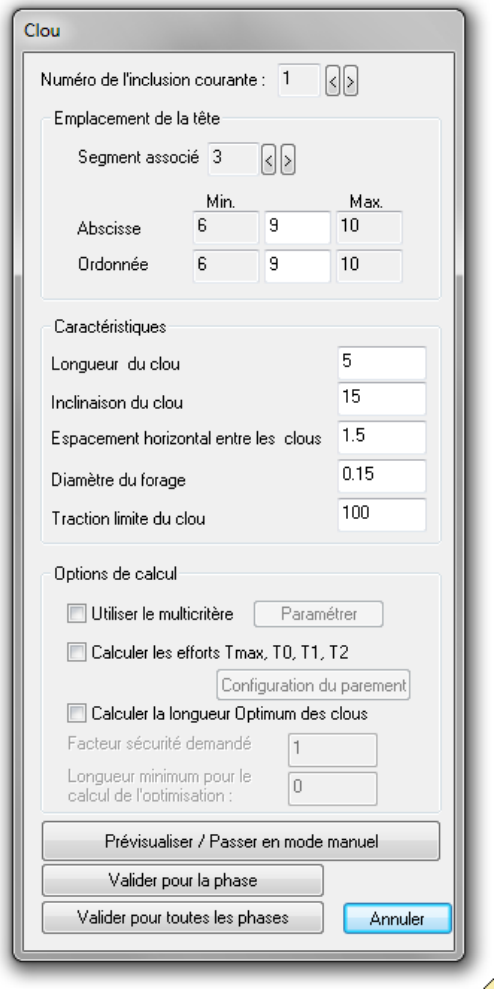


Figure 58 : Insertion d'un clou

Un clou / une épingle par défaut s'active sur la zone de travail. Le clou / l'épingle est représenté(e) par un trait rouge incliné et la tête de l'inclusion est surmontée d'un axe en pointillés (orthogonal au profil existant).
Le déplacement latéral de cet axe, est lié au déplacement du curseur.

Mode opératoire :

a- Déplacer le curseur à la position désirée. La boîte de dialogue renseigne sur le numéro du segment, ainsi que sur les possibilités d'abscisses et d'ordonnées (intervalle) liées au segment où sera positionnée l'inclusion, ainsi que sur les coordonnées exactes du point d'application de l'inclusion. Cliquer pour saisir le point d'application retenu.

b- Déplacer le jusqu'à obtenir la longueur correcte de l'inclusion. L'extrémité de l'inclusion est dépendante de la position de la souris. Cliquer pour saisir cette longueur.

c- Déplacer le curseur de la manière à ajuster l'inclinaison retenue. Cette inclinaison se mesure par rapport à l'horizontale et est positive dans le sens horaire. Elle peut être comprise entre 90° et l'angle TN/Horizontale.

- L'axe : c'est l'inclusion proprement dite.
- L'angle est compté positif vers le bas à partir de l'horizontale.
- Le domaine admissible, c'est l'ensemble du terrain sous le segment concerné en ne dépassant pas une inclusion de plus de 90°.

d- La boîte de dialogue permet à cet instant de saisir manuellement les autres propriétés telles que l'espacement horizontal entre les inclusions, le diamètre du forage et la traction limite de l'inclusion.

e- Pour saisir un clou / une épingle manuellement, cliquer sur le bouton « Passer en mode manuel ». Saisir alors toutes les propriétés de l'inclusion. Cliquer sur le bouton « Prévisualiser » pour avoir un aperçu graphique de la saisie. Si ces valeurs sont correctes, cliquer sur les boutons « Valider pour la phase » ou « Valider pour toutes les phases » selon que les propriétés soient validées pour la phase en cours ou pour l'ensemble du projet sinon sur « Annuler ».

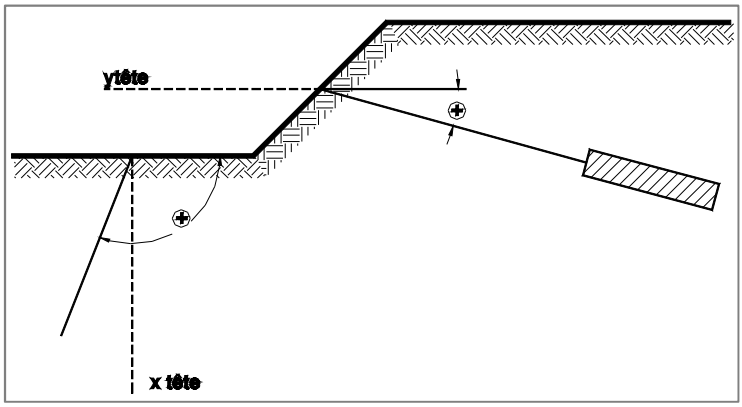
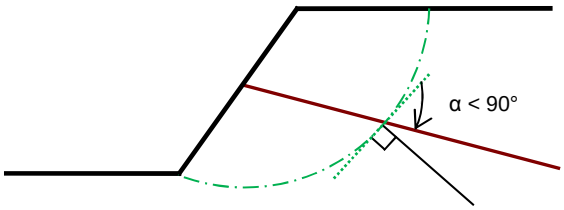
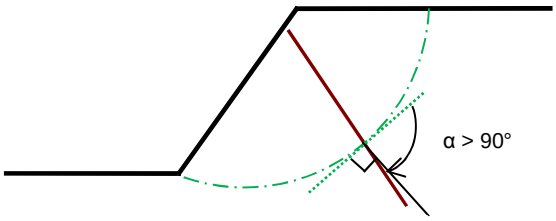


Figure 59 : Mode d'orientation des inclusions



CLOU EN TRACTION

Figure 60 : α < 90° ; clou en traction



CLOU EN COMPRESSION

Figure 61 : α > 90° ; clou en compression

Le clou est considéré comme une inclusion liée en tête à un parement alors que l'épingle est libre en tête. La traction réelle dans l'épingle est aussi minorée par la distance paroi / surface de rupture.

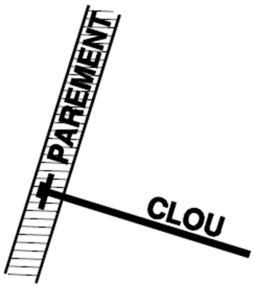


Figure 62 : Définition d'un clou sous GEOSTAB (lié au parement)

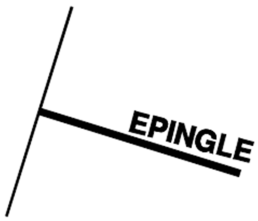


Figure 63 : Définition d'une épingle sous GEOSTAB (libre en tête)

f- la fenêtre de saisie (clou ou épingle présente enfin 3 options :

- « utiliser le multicritère »
- « calcul des efforts T_{max}, T0, T1, T2 »
- « calculer la longueur Optimum des clous »

Ces options sont développées dans les paragraphes suivants.

Remarques :

Le point de la tête du clou ne doit pas forcement correspondre à un point du T.N mais est obligatoirement positionné sur un segment.

La traction limite dans l'armature correspond généralement à son effort limite élastique (section multipliée par nuance d'acier).

Dans le cas des clous auto-foreurs, il faut prendre comme diamètre de forage le diamètre équivalent du frottement sol-inclusion.
Des caractéristiques de clous couramment utilisés sont donnes en Annexe A du présent document.

3.7.1.1 Multicritère

Cette option permet la prise en compte des efforts de cisaillement dans les inclusions.
Il est alors possible de calculer ces inclusions en mode combiné traction-cisaillement ou en cisaillement pur selon la méthode du multicritère.
Si les inclusions sont calculées sans tenir compte du multicritère et qu'elles travaillent en compression, leur contribution à la stabilité est négligée.
Lorsque le multicritère est activé, la résistance au cisaillement de l'inclusion est prise égale à sa traction limite divisée par 2.

L'utilisateur a la possibilité d'activer le mode multicritère en cochant la case « Utiliser le multicritère » dans chacune de ces boîtes de dialogue (figures 57 et 58 précédentes) puis en cliquant sur « paramétrer ». Une nouvelle boîte de dialogue s'affiche. Elle est représentée ci-dessous.

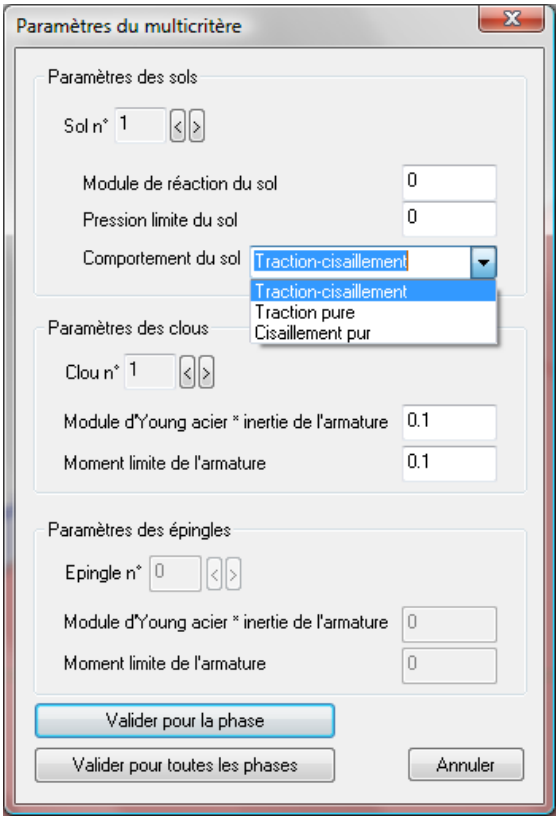


Figure 64 : Paramétrage du multicritère

Mode opératoire :

a- Renseigner successivement les champs spécifiques aux données des sols, et des inclusions impliquées.
Entrée de paramètres de sols complémentaires :
- Modules de réaction (K_f ou K_s),
- Pressions limites p_l^*,
- Comportement : traction pure, cisaillement pur ou traction/cisaillement.

Entrée de paramètres d'inclusions complémentaires :
- Produit d'inertie EI,
- Moment limite : $W_{el} \cdot \sigma_e$ (W_{el} : module de flexion élastique).

b- Si les valeurs saisies sont correctes, valider la procédure de saisie en cliquant sur le bouton « Valider pour la phase » ou « valider pour toutes les phases » selon que les propriétés soient validées pour la phase en cours ou pour l'ensemble du projet sinon sur le bouton « Annuler ».

Cette commande est applicable aux clous et épingles. Elle permet de calculer ces inclusions en mode combiné traction-cisaillement ou cisaillement pur selon la méthode du multicritère.

(L'approche modélisée dans GEOSTAB est celle proposée par Blondeau, Christiansen, Guilloux et Schlosser (1984). Cependant, l'attention de l'utilisateur est attirée sur le fait que la prise en compte de cette approche a été largement mise en cause, notamment par Bridle (1989), Jewell & Pedley (1990) et Bridle (1990).)

Les données à saisir sont résumées dans le tableau ci-dessous. :

Désignation	Symbole	Unité SI
Pour chaque sol		
Module de réaction surfacique du sol (cf. Annexe B) Pression limite du sol Comportement du sol : - Traction-cisaillement - Traction pure - Cisaillement pur	K_s p_l	kN/m^3 kN/m^2
Pour chaque inclusion		
Module Young * Inertie de l'armature Moment limite de l'armature	E*Inertie M_{limite}	$kN.m^2$ kN.m

Tableau 3 : Données et unités du multicritère

Remarques :
Le moment limite de l'armature correspond au moment nécessaire pour que l'armature atteigne sa limite élastique en flexion pure.

3.7.1.2 *Calcul des efforts au parement*

Le logiciel GEOSTAB permet désormais de récupérer les efforts nécessaires au dimensionnement du parement d'une paroi clouée (cf. paragraphe 7.1 de la section « Considérations théoriques »).
Avec cette option de calcul, 4 efforts sont calculés par GEOSTAB :

- T_{max} : effort maximal strictement nécessaire à l'intersection clou / surface de rupture sur l'ensemble des surfaces calculées pour obtenir le facteur de sécurité visé,
- T0 : T_{max} minoré du frottement latéral entre le parement et la surface de rupture,
- T1 : Effort nécessaire dans l'axe du clou pour mobiliser un frottement suffisant à l'arrière du parement pour reprendre le poids de celui-ci (condition de non-glissement du parement),
- T2 : effort strictement nécessaire pour que le parement puisse reprendre les efforts de poussée selon un diagramme défini par l'utilisateur.

L'effort dans le clou à entrer dans GEOSPAR correspondra donc simplement au maximum des 3 efforts (T0, T1 et T2) calculés directement par GEOSTAB.

L'utilisateur a la possibilité d'activer le mode de calcul des efforts en cochant la case « Calcul des efforts Tmax, T0, T1, T2 » pour les clous et épingles dans chacune de ces boîtes de dialogue correspondantes (figures 57 et 58 précédentes). En cliquant sur « Configuration du parement », une nouvelle boîte de dialogue s'affiche. Elle est représentée ci-dessous.

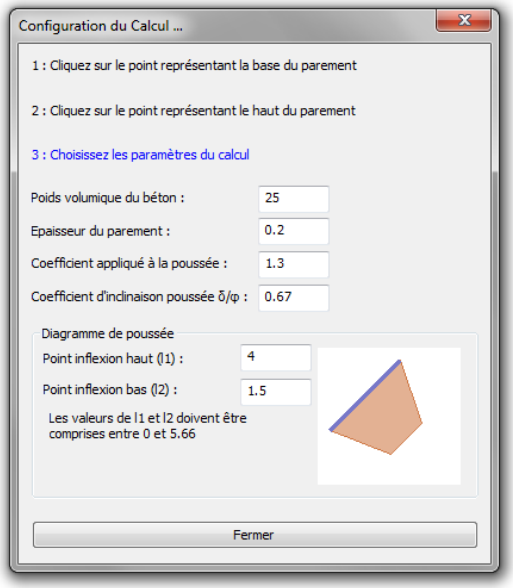

Configuration du Calcul ...
1 : Cliquez sur le point représentant la base du parement
2 : Cliquez sur le point représentant le haut du parement
3 : Choisissez les paramètres du calcul
Poids volumique du béton :
25
Epaisseur du parement :
0.2
Coefficient appliqué à la poussée :
1.3
Coefficient d'inclinaison poussée δ/φ :
0.67
Diagramme de poussée
Point inflexion haut (l1) :
4
Point inflexion bas (l2) :
1.5
Les valeurs de l1 et l2 doivent être comprises entre 0 et 5.66
Fermer

Figure 65 : Configuration – calcul des efforts au parement

Mode opératoire :

a- Délimiter graphiquement la base et le haut du parement par accrochage aux points existants (insérer préalablement des points si nécessaire).

b- Renseigner successivement les données caractéristiques du parement :

- poids volumique,
- épaisseur,
- coefficient appliqué à la poussée qui est fonction du rapport entre déplacement attendu de la paroi et déplacement nécessaire pour mobiliser la poussée active,
- coefficient d'inclinaison de la poussée (δ/φ).

c- Définir le diagramme de poussée en redistribuant l'effort sur le parement (positionnement des points d'inflexions hauts et bas).

d- Si les valeurs saisies sont correctes, cliquer sur « Fermer ». Pour modifier les points définissant le parement ou les caractéristiques associées, cliquer à nouveau sur « Configuration du parement » et répéter les opérations a- à c-.

3.7.1.3 *Calcul des longueurs optimisées*

La dernière option consiste à calculer pour chaque lit de clous, la longueur strictement nécessaire pour obtenir le facteur de sécurité visé (cf. paragraphe 7.2 de la section « Considérations théoriques »).

L'utilisateur active cette option en cochant la case « Calculer la longueur optimisée des clous » pour les clous ou épingles dans chacune de ces boîtes de dialogue correspondantes (figures 57 et 58 précédentes).
Les champs suivants s'activent et sont à renseigner :

- Facteur de sécurité demandé,
- Longueur minimale pour le calcul de l'optimisation (la longueur maximale étant prise égale à la longueur du clou définie dans les caractéristiques de l'inclusion (cf. figures 57 et 58).

Un algorithme de recherche par profondeur détermine la longueur minimale assurant la stabilité au facteur de sécurité visé (entré par l'utilisateur).

3.7.2 *Tirant d'ancrage*

3.7.2.1 Saisie des tirants

Pour la saisie d'un tirant, cliquer sur le bouton « Tirant » (barre d'outils « Création d'une inclusion »).
La boîte de dialogue ci-dessous se présente. Un tirant par défaut s'active sur la zone de travail.
Le tirant est représenté par un trait rouge, épaissi à l'extrémité en profondeur et incliné. Sa tête est surmontée d'un axe en pointillés (orthogonal au segment auquel il est lié).
Le déplacement latéral de cet axe, est lié au déplacement du curseur. Suivant les actions, la boîte de dialogue renseigne sur les coordonnées du point d'application du tirant.

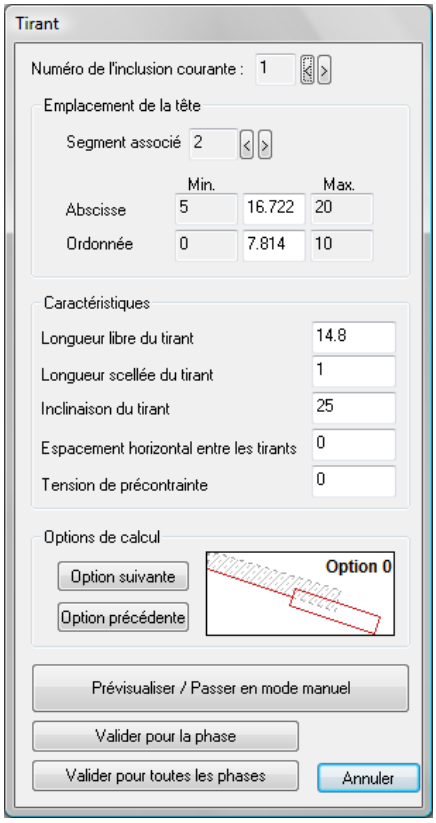


Figure 66 : Saisie des tirants

Mode opératoire :

a- Déplacer le curseur à l'abscisse désirée. La boîte de dialogue renseigne sur le numéro du segment, ainsi que sur les possibilités d'abscisses et d'ordonnées (intervalle) liées au segment où sera positionné le tirant. Cliquer pour saisir l'abscisse retenue.

b- Déplacer le jusqu'à obtenir la longueur correcte du tirant. L'extrémité du tirant est dépendante de la position de la souris. Cliquer pour saisir cette longueur.

c- Déplacer le curseur de la manière à ajuster l'inclinaison retenue. Cette inclinaison se mesure par rapport à l'horizontale et est positive dans le sens horaire. Elle peut être comprise entre 90° et l'angle TN/Horizontale.

d- La boîte de dialogue permet à cet instant de saisir les autres propriétés tel que la longueur scellée, l'espacement horizontal entre les tirants, la tension de précontrainte.

e- En outre, il est possible de définir le modèle de répartition de l'effort de précontrainte le long du tirant, en prenant en compte les « effet de bord » au niveau de la partie scellée. Et cela en parcourant les modes disponibles (figure ci-contre). Cliquer soit sur « Option suivante » ou soit sur « Option précédente ». Dans la zone en regard de ces boutons, l'aperçu graphique du mode choisi. Les 4 modes possibles sont définis ci-dessous.

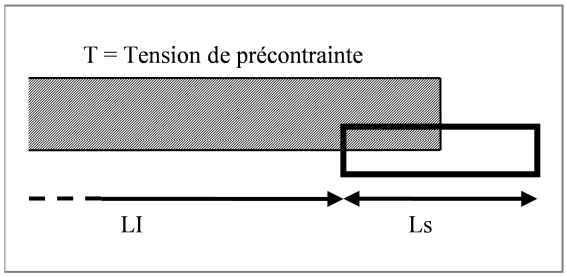


Figure 67 : Option 0

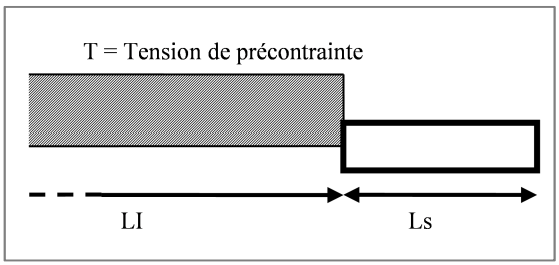


Figure 68 : Option 2

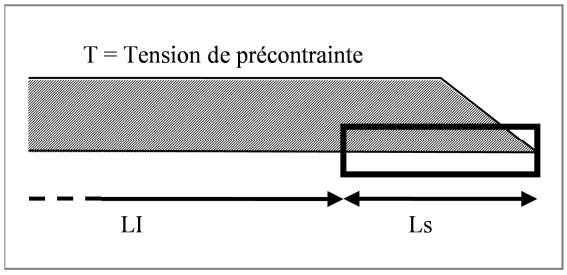


Figure 69 : Option 1

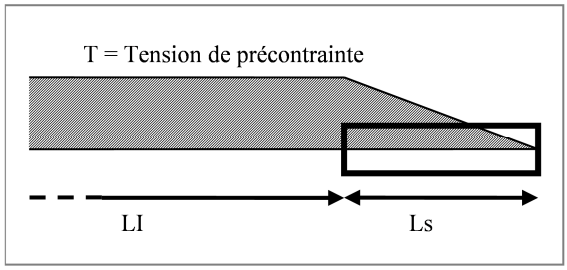


Figure 70 : Option 3

f- Pour saisir un tirant manuellement, cliquer sur le bouton « Passer en mode manuel ». Commencer par saisir toutes les propriétés du tirant. Cliquer sur le bouton « Prévisualiser » pour avoir un aperçu graphique de la saisie.
Si ces valeurs sont corrects, cliquer sur les boutons « Valider pour la phase » ou « Valider pour toutes les phases » selon que les propriétés soient validées pour la phase en cours ou pour l'ensemble du projet sinon sur « Annuler ».

Remarques :
Le point de la tête du tirant ne correspond pas forcément à un point de la géométrie mais est obligatoirement positionné sur un segment.
Le segment sur lequel s'appuie la tête du tirant n'appartient pas forcement au TN.
L'inclinaison du tirant est repérée par rapport à l'horizontale et orientée positive vers le bas

Voici le rappel des paramètres à entrer :

Désignation	Unité SI
N° du segment sur lequel s'appuie la tête du tirant	-
Abscisse de la tête du tirant	m
Altitude de la tête du tirant	m
Longueur libre	m
Longueur scellée	m
Inclinaison du tirant	degrés
Espacement horizontal entre les tirants	m
Tension de précontrainte	kN
Mode de calcul du tirant (cf. schéma)	

Tableau 4 : Tirants - Données et unités

3.7.2.2 Méthode de Kranz : Vérification des écrans tirantés

GEOSTAB permet la vérification de la longueur des tirants, en accord avec les recommandations de l'Eurocode 7 selon la méthode de Kranz (cf. NF P 94-282 – Annexe G et paragraphe 8 de la section « Considérations théoriques » du présent document).
Pour activer cette option, sélectionner «Vérifications tirant méthode de Kranz » du menu « Outils » de la barre d'outils. La fenêtre ci-dessous s'affiche.

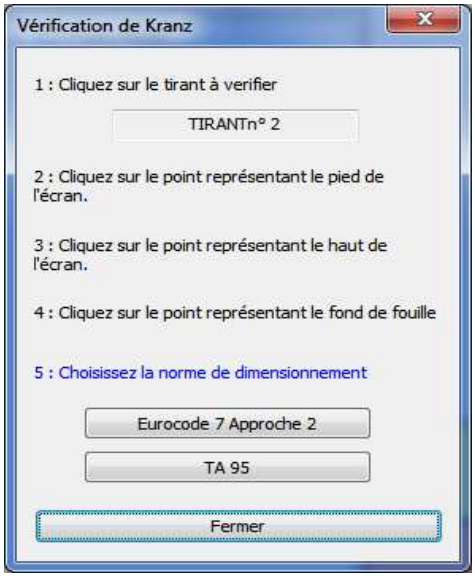

Vérification de Kranz
1 : Cliquez sur le tirant à verifier
TIRANTn° 2
2 : Cliquez sur le point représentant le pied de l'écran.
3 : Cliquez sur le point représentant le haut de l'écran.
4 : Cliquez sur le point représentant le fond de fouille
5 : Choisissez la norme de dimensionnement
Eurocode 7 Approche 2
TA 95
Fermer

Figure 71 : Vérification de Kranz

Mode opératoire :

a- Sélectionner le tirant à vérifier vis-à-vis du renversement. Cette mention apparaît en bleu dans la boîte de dialogue.

b-Suivre les instructions 2 à 4 pour la définition de l'écran (pied et sommet) et du fond de fouille.
Ces opérations s'effectuent graphiquement.

c- Sélectionner ensuite la norme souhaitée pour la vérification, au choix entre :

- Eurocodes 7 (approche 2),
- TA 95, Recommandations Tirants d'Ancrages

d- Si les données saisies sont correctes, cliquer sur « Fermer ». Pour modifier les points définissant l'écran ou le fond de fouille, sélectionner à nouveau «Vérifications tirant méthode de Kranz » du menu « Outils » et répéter les opérations a à c.

Remarques :
La vérification au TA 95 implique des coefficients partiels tous égaux à 1 et un coefficient global de 1,5. La vérification à l'Eurocode 7, Approche 2 introduit des coefficients partiels qui sont présentés dans l'annexe C.

Une nouvelle phase nommée « Vérif. Kranz » est alors créée. Dans cette phase, la géométrie est celle du bloc associé au tirant ; le sol en amont du bloc est désactivé et est remplacé par la poussée active qu'il impose au bloc ; les tirants sont remplacés par des forces ponctuelles.

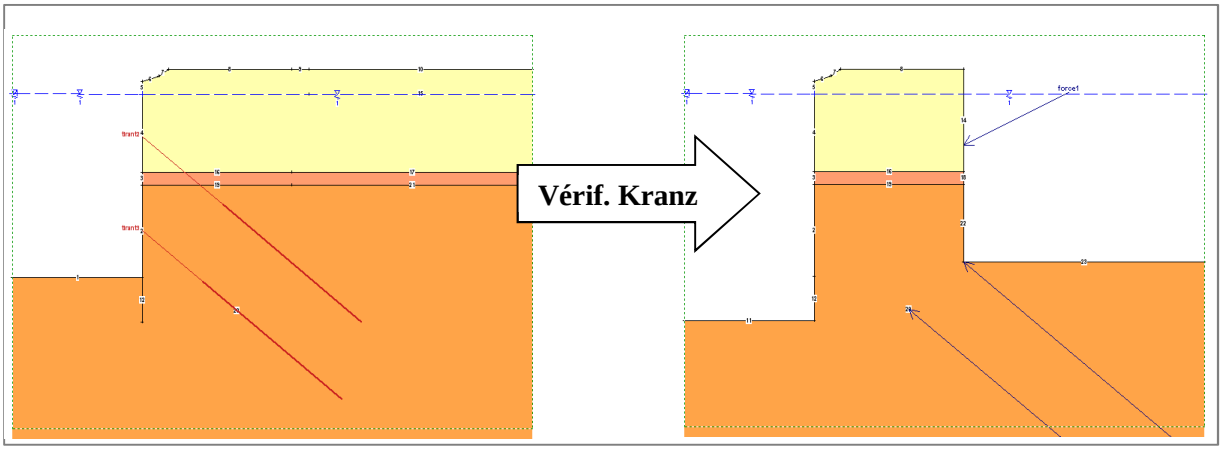


Figure 72 : Modélisation du tirant

Les opérations précédentes conduisent à l'ouverture d'une seconde fenêtre, représentées ci-dessous, correspondant à la définition du modèle de surfaces de rupture pour la vérification de Kranz. Elle est aussi directement accessible en cliquant sur l'option « Modification du modèle de génération des surfaces de rupture »

Cette commande permet de générer des surfaces de rupture logarithmiques concaves passant par des zones aval (définie suivant l'axe Y et qui doit théoriquement correspondre au point d'effort tranchant nul ; ce point étant inconnu par GEOSTAB, une recherche est effectuée en parcourant tous les points de l'écran compris entre la base de la fiche et le fond de fouille) et amont (définie par le point d'application de la force représentant le tirant).

Les valeurs entrées par défaut peuvent être modifiées graphiquement:

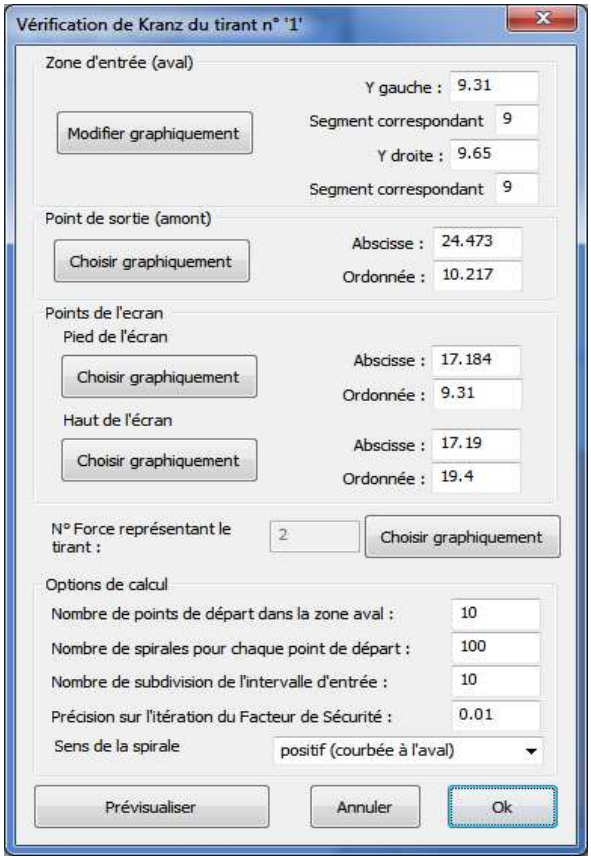

Vérification de Kranz du tirant n° '1'
Zone d'entrée (aval)
Modifier graphiquement
Y gauche : 9.31
Segment correspondant 9
Y droite : 9.65
Segment correspondant 9
Point de sortie (amont)
Choisir graphiquement
Abscisse : 24.473
Ordonnée : 10.217
Points de l'ecran
Pied de l'écran
Choisir graphiquement
Abscisse : 17.184
Ordonnée : 9.31
Haut de l'écran
Choisir graphiquement
Abscisse : 17.19
Ordonnée : 19.4
N° Force représentant le tirant : 2
Choisir graphiquement
Options de calcul
Nombre de points de départ dans la zone aval : 10
Nombre de spirales pour chaque point de départ : 100
Nombre de subdivision de l'intervalle d'entrée : 10
Précision sur l'itération du Facteur de Sécurité : 0.01
Sens de la spirale positif (courbée à l'aval)
Prévisualiser
Annuler
Ok

Figure 73 : Méthode de Kranz – Surfaces de ruptures

Mode opératoire (graphique) :

a- Cliquer sur le bouton « Modifier graphiquement » de la zone d'entrée (aval). Un axe horizontal coloré en vert se présente et est associé au déplacement du curseur. Suivant les déplacements, les valeurs des ordonnées s'inscrivent dans la boîte de dialogue. Cliquer pour valider la valeur de l'ordonnée gauche (Y_{gauche}) de la zone d'entrée.

b- Déplacer l'axe horizontal jusqu'en haut de la zone. Une aire colorée en vert symbolise l'intervalle considéré :
La valeur de la limite (Y_{droite}) est ainsi connue. Cliquer pour valider cette valeur.

c- Cliquer sur le bouton « Choisir graphiquement » du point de sortie (amont) et sélectionner le point voulu. Ce point n'est définissable qu'à droite de la zone d'entrée.
Les points représentant le pied de l'écran et le haut de l'écran mais aussi la force représentant le tirant peuvent être modifiés graphiquement en choisissant le bouton « Choisir graphiquement » correspondant.

Le numéro de force représentant le tirant est automatiquement saisi mais il vous est toujours possible de le saisir graphiquement.

Vous pouvez modifier les options de calcul (surfaces de rupture de type spirales), à savoir :
- le nombre de points de départ dans la zone aval,
- le nombre de spirales pour chaque point de départ,
- le nombre de subdivisions de l'intervalle d'entrée,
- la précision sur l'itération du facteur de sécurité.

Le signe de constante de la spirale peut aussi être modifié (cf. paragraphe 3.10.2).

Ces opérations peuvent être conduites manuellement comme graphiquement.
Le bouton « Prévisualiser » permet de visualiser la configuration choisie sans la valider pour autant.
Valider la procédure en cliquant sur le bouton « OK » sinon cliquer « Annuler ».

A partir de cet instant, le calcul peut être lancé pour la phase « Vérif. Kranz ». Le calcul est itératif jusqu'à atteindre l'état limite de stabilité au glissement du sol (facteur de sécurité égal à 1).

En bas de la feuille de résultat, apparaît le tableau suivant :

N°	Xc	Yc	φ	Fs	R'	Rs	FS Kranz	Pe	X Pe	Y Pe	θ
	11.970	0.0500	31.500	0.997	1242	491.4	2.527	222.4	10.01	11.48	29.93
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Légende :

SURFACE DE RUPTURE

1 Abscisse du centre de la spirale
2 Ordonnée du centre de la spirale
3 Constante de la spirale

REACTION DE L'ECRAN

8 Intensité de la force
9 Abscisse de la force
10 Ordonnée de la force
11 Inclinaison de la force

RESULTAT

4 Facteur de sécurité à la rupture (doit être proche de 1)
5 Réaction d'ancrage maximum
6 Précontrainte du tirant d'ancrage
7 Facteur de sécurité de la méthode de Kranz

3.7.3 *Massif géotextile*

Pour la saisie d'un massif géotextile, cliquer sur le bouton « Massif géotextile » (Outils « Création d'une inclusion »).

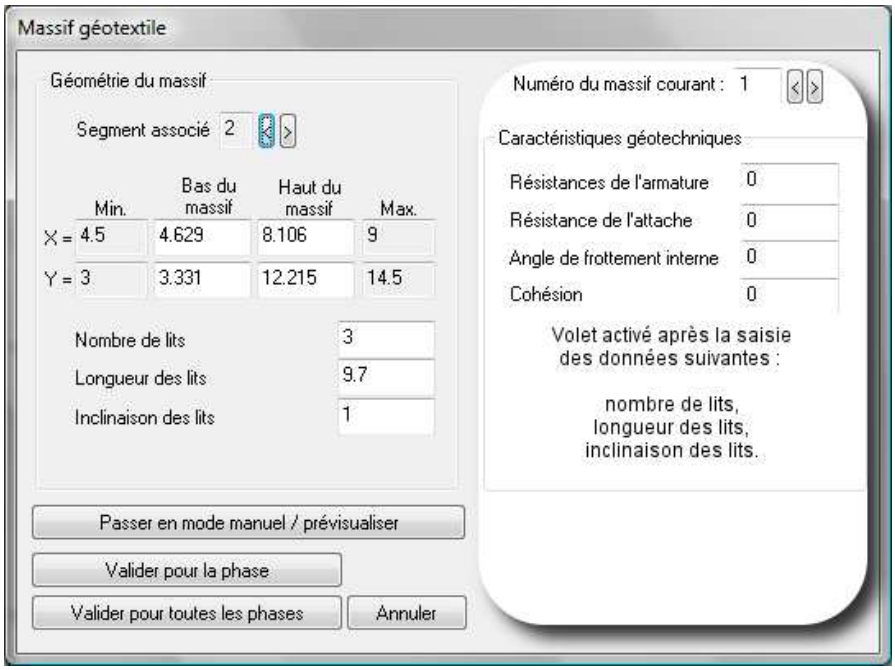

Massif géotextile
Géométrie du massif
Segment associé 2
Min.
Bas du massif
Haut du massif
Max.
X = 4.5 4.629 8.106 9
Y = 3 3.331 12.215 14.5
Nombre de lits 3
Longueur des lits 9.7
Inclinaison des lits 1
Numéro du massif courant : 1
Caractéristiques géotechniques
Résistances de l'armature 0
Résistance de l'attache 0
Angle de frottement interne 0
Cohésion 0
Volet activé après la saisie des données suivantes :
nombre de lits, longueur des lits, inclinaison des lits.
Passer en mode manuel / prévisualiser
Valider pour la phase
Valider pour toutes les phases
Annuler

Figure 74 : Saisie d'un massif géotextile

La boîte de dialogue ci-dessus se présente. Un massif géotextile par défaut s'active sur la zone de travail.
Il est représenté par un trait rouge correspondant au dernier lit du massif puis de 3 traits rouges dès que l'on a sélectionné la position du pied du massif. La tête du dernier lit (la position de ce dernier) est surmontée d'un axe en pointillés (orthogonal au segment auquel il est lié).
Le déplacement latéral de cet axe est lié au déplacement du curseur. Après un ensemble d'actions décrites de a à c du mode opératoire, il est possible de constater que la boîte de dialogue donne sur les propriétés du massif géotextile.

Mode opératoire :

a- Déplacer le curseur à l'abscisse ou à l'ordonnée désirée. La boîte de dialogue renseigne sur le numéro du segment, ainsi que sur les possibilités d'abscisses et d'ordonnées (intervalle) liées au segment où seront positionnés les lits du massif. Cliquer pour saisir l'abscisse retenue. Réitérer cette action pour saisir le haut du massif.

b- Déplacer le jusqu'à obtenir la longueur correcte des lits du massif. L'extrémité du massif est dépendante de la position de la souris. Cliquer pour saisir cette longueur.

c- Déplacer le curseur de la manière à ajuster l'inclinaison retenue. Cette inclinaison se mesure par rapport à l'horizontale et est positive dans le sens horaire. Elle peut être comprise entre 90° et l'angle TN/Horizontale.

d- À ce stade, la partie droite de la boîte de dialogue s'élargit et laisse place aux paramètres mécaniques qui doivent être saisis pour chaque massif impliqué. Le nombre de lits et leurs caractéristiques peuvent être modifiés manuellement. Pour naviguer sur l'ensemble des massifs, il suffit de cliquer sur les boutons < et >.

d- Pour saisir manuellement un massif géotextile, il faut cliquer sur le bouton « Passer en mode manuel ». Commencer par saisir toutes les propriétés du massif. Cliquer sur le bouton « Pré visualiser » pour avoir un aperçu graphique de la saisie. Si ces valeurs sont correctes, cliquer sur les boutons « Valider pour la phase » ou « Valider pour toutes les phases » selon que les propriétés soient validées pour la phase en cours ou pour l'ensemble du projet sinon « Annuler ».

Les paramètres à saisir sont récapitulés dans le tableau ci-dessous :

Désignation	Unité SI
N° du segment auquel sont reliés les géotextiles en tête	-
Abscisse du bas du massif	m
Abscisse du haut du massif	m
nbre de lits dans le massif	-
Longueur des lits	m
Inclinaison des lits	°
Résistance de l'armature	kN
Résistance de l'attache	kN
Angle de frottement à l'interface sol-géotextile	°
Cohésion à l'interface sol-géotextile	kN/m²

Tableau 5 : Massif géotextile – Données et unités

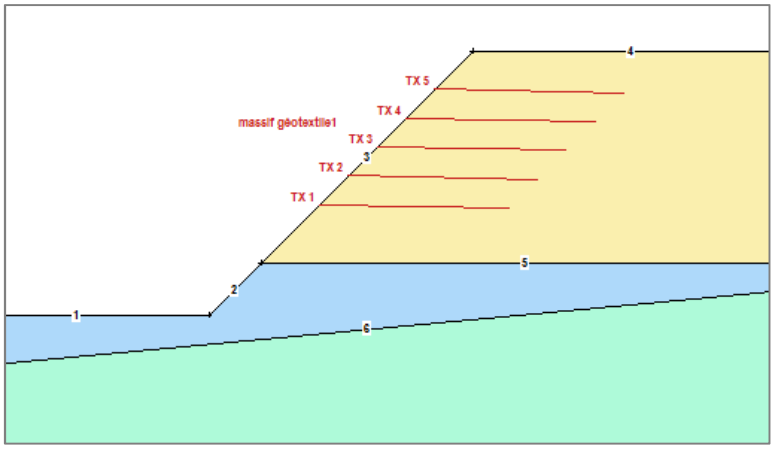


Figure 75 : Visualisation Massif géotextile

Remarques :
Chaque massif géotextile ne doit s'appuyer que sur un seul segment.
Le segment sur lequel s'appuie le massif n'appartient pas forcement au T.N.
Les lits sont répartis de façon homogène entre les limites du massif avec un lit en limite supérieure et un autre lit en limite inférieure.
Si les caractéristiques mécaniques pour un lit sont différentes, alors que les caractéristiques géométriques sont identiques, il faut quand même rentrer ce lit séparément.

Les efforts calculés dans chaque lit de chaque massif correspondent au minimum des efforts calculés suivant 3 critères :

- l'effort de résistance de l'armature,
- l'effort de résistance de l'attache, additionné du frottement mobilisable (poids des terres au-dessus du lit multiplié par tan (φ)) entre le parement et la surface de rupture.
- l'effort mobilisable (poids des terres au-dessus du lit multiplié par tan (φ)) entre la surface de rupture et l'extrémité du renforcement.

3.7.4 *Massif Terre Armée*

Pour la saisie d'un massif Terre Armée, cliquer sur le bouton « Massif Terre Armée ». La boîte de dialogue ci-dessus se présente.

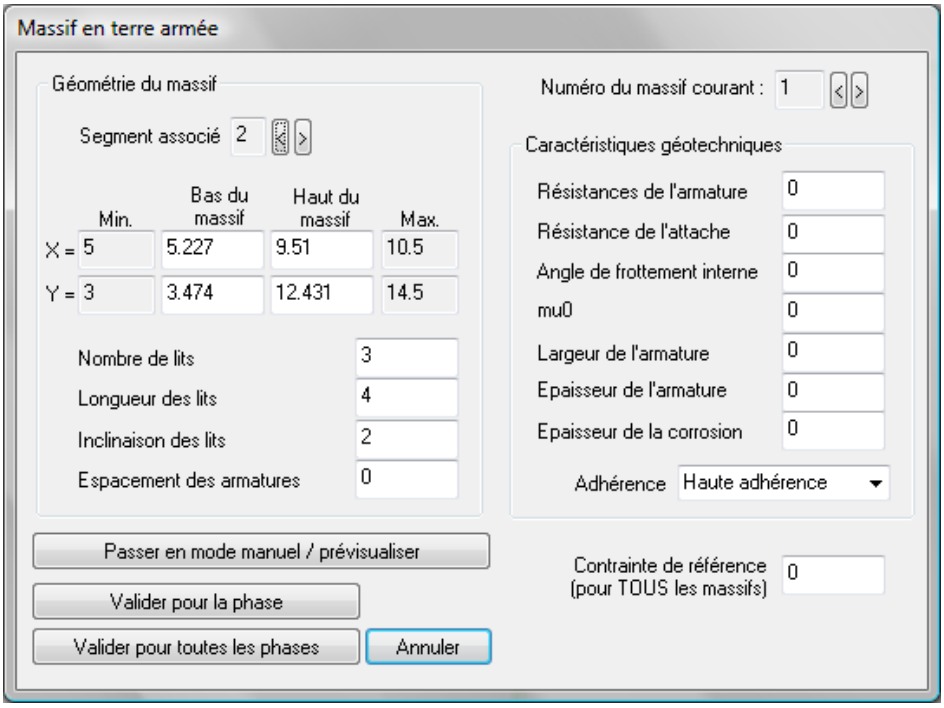


Figure 76 : Saisie d'un massif Terre Armée

Un massif Terre Armée par défaut s'active sur la zone de travail.
Il est représenté par un trait rouge correspondant au dernier lit du massif puis de 3 traits rouges dès que l'on a sélectionné la position du pied du massif. La tête du dernier lit (la position de ce dernier) est surmontée d'un axe en pointillés (orthogonal au segment auquel il est lié).
Le déplacement latéral de cet axe est lié au déplacement du curseur. Après un ensemble d'actions décrites de a à c du mode opératoire, il est possible de constater que la boîte de dialogue donne sur les propriétés du massif Terre Armée.

Mode opératoire :

a- Déplacer le curseur à l'abscisse ou à l'ordonnée désirée. La boîte de dialogue renseigne sur le numéro du segment, ainsi que sur les possibilités d'abscisses et d'ordonnées (intervalle) liées au segment où seront positionnés les lits du massif. Cliquer pour saisir l'abscisse retenue. Réitérer cette action pour saisir le haut du massif.

b- Déplacer le jusqu'à obtenir la longueur correcte des lits du massif. L'extrémité du massif est dépendante de la position de la souris. Cliquer pour saisir cette longueur.

c- Déplacer le curseur de la manière à ajuster l'inclinaison retenue. Cette inclinaison se mesure par rapport à l'horizontale et est positive dans le sens horaire. Elle peut être comprise entre 90° et l'angle TN/Horizontale.

d- À ce stade, la partie droite de la boîte de dialogue s'élargit et laisse place aux paramètres supplémentaires (les caractéristiques géotechniques du massif en cours ainsi que la contrainte de référence qui affecte tous les massifs) qui peuvent être saisis pour chaque massif impliqué. Pour naviguer sur l'ensemble des massifs, il suffit de cliquer sur les boutons < et >.

e- Pour saisir manuellement un massif, il faut cliquer sur le bouton « Passer en mode manuel ». Commencer par saisir toutes les propriétés du massif. Cliquer sur le bouton « Pré visualiser » pour avoir un aperçu graphique de la saisie. Si ces valeurs sont correctes, cliquer sur les boutons « Valider pour la phase » ou « Valider pour toutes les phases » selon que les propriétés soient validées pour la phase en cours ou pour l'ensemble du projet sinon « Annuler ».

Voici le rappel des paramètres à saisir :

Désignation	Unité SI
Caractéristiques géométriques	
N° de segment	-
Abscisse du bas du massif	m
Abscisse du haut du massif	m
Nombre de lits	-
Longueur des lits	m
Inclinaison des lits	°
Espacement des armatures	m
Caractéristiques géotechniques	
Résistance de l'armature	kN
Résistance de l'attache	kN
Angle de frottement interne	°
μ_0 coefficient d'interaction sol/lit de renforcement.	
Largeur de l'armature	m
Epaisseur de l'armature	m
Epaisseur de la corrosion	m
Adhérence :	haute adhérence lisse

Tableau 6 : Massif Terre Armée – Données et unités

Remarque :

Les efforts calculés dans chaque lit de chaque massif correspondent au minimum des efforts calculés suivant 3 critères :

- l'effort de résistance de l'armature,
- l'effort de résistance de l'attache, additionné du frottement mobilisable (poids des terres au-dessus du lit multiplié par tan (φ)) entre le parement et la surface de rupture.
- l'effort mobilisable (poids des terres au-dessus du lit multiplié par tan (φ)) entre la surface de rupture et l'extrémité du renforcement.

3.8 Saisie des données sismiques

La vérification sismique de la stabilité se fait par rotation de la géométrie, sauf si cette rotation amène des segments en surplomb (ajout d'efforts dans les équations). Sélectionner l'option « Séisme » du menu « Préparation des données » puis compléter la saisie sur la boîte de dialogue du séisme (figure ci-dessous), en entrant respectivement la valeur du rapport de l'accélération sismique horizontale et verticale sur la gravité, ainsi que la pression de cavitation.

Le séisme ne sera activé que pour le cas courant. Il sera proposé automatiquement la création ou la modification du cas sismique concomitant.

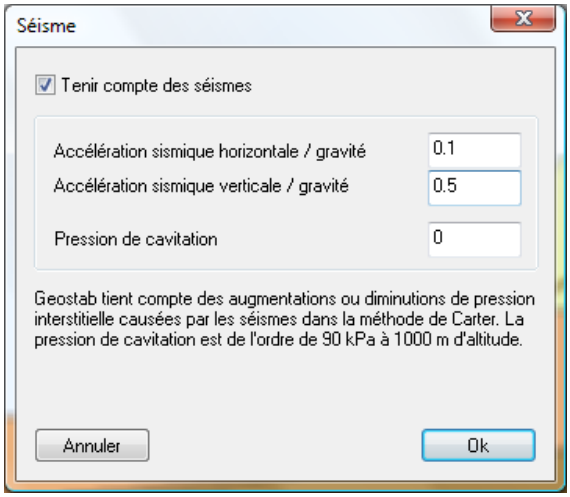

Séisme
Tenir compte des séismes
Accélération sismique horizontale / gravité
0.1
Accélération sismique verticale / gravité
0.5
Pression de cavitation
0
Geostab tient compte des augmentations ou diminutions de pression interstitielle causées par les séismes dans la méthode de Carter. La pression de cavitation est de l'ordre de 90 kPa à 1000 m d'altitude.
Annuler
Ok

Figure 77 : Saisie du séisme

Mode opératoire :

a- Cocher la case « Tenir compte des séismes » pour activer la prise en compte du séisme

b- Choisir les paramètres d'accélération horizontale et verticale (coefficients en application de l'EC8-5):

$\sigma_h = \frac{1}{r} a_{gr} \gamma_l \frac{S}{g}$ *et* $\sigma_v = \pm 0{,}5\ \sigma_h$ *(ouvrages de soutènement)*

$\sigma_h = 0.5 a_{gr} \gamma_l \frac{S}{g}$ *et* $\sigma_v = \pm 0{,}5\ \sigma_h$ *(stabilité des pentes)*

La valeur de $\sigma_V > 0$ pour le séisme allégeant et $\sigma_V < 0$ pour le séisme pesant

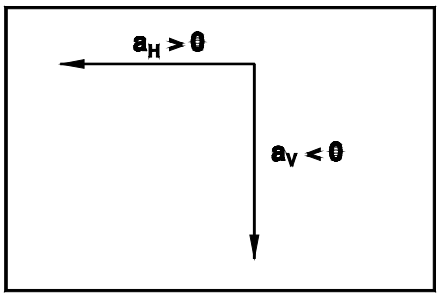
Saisir la pression de cavitation si nécessaire. Celle-ci est utilisée dans le cas de calcul par la méthode de Carter. Elle correspond à l'augmentation ou diminution de la pression interstitielle causée par le séisme. Les pressions interstitielles peuvent devenir négatives pour les sols saturés mais ne peuvent pas excéder la pression de la cavitation spécifiée.

c- Après validation, le logiciel propose de créer automatiquement le cas de séisme concomitant

Désignation	Symbole	Unité SI
Accélération sismique horizontale / gravité	a_{horiz}/g	-
Accélération sismique verticale / gravité	a_{vert}/g	-
Pression de cavitation	$P_{ression\ cavitation}$	kN/m^2

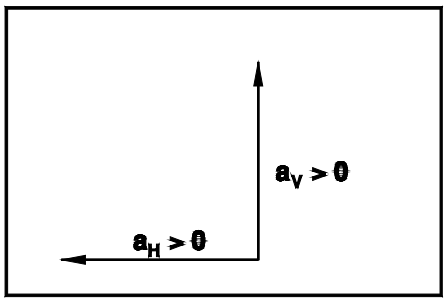
Tableau 7 : Séisme – Données et unités

Remarques :
L'accélération sismique horizontale est orientée positive vers l'aval.
L'accélération sismique verticale est orientée positive vers le haut.



COMBINAISON A

Figure 78 : Séisme pesant



COMBINAISON B

Figure 79 : Séisme allégeant

3.9 Saisie des coefficients de sécurité partiels

L'utilisateur peut appliquer des coefficients sur toutes les caractéristiques des sols et des inclusions saisies, ainsi que des coefficients de méthode. Pour cela, sélectionner l'option « Coefficients de sécurité partiels » du menu « Préparation des données ». La boîte de dialogue ci-dessous apparaît :

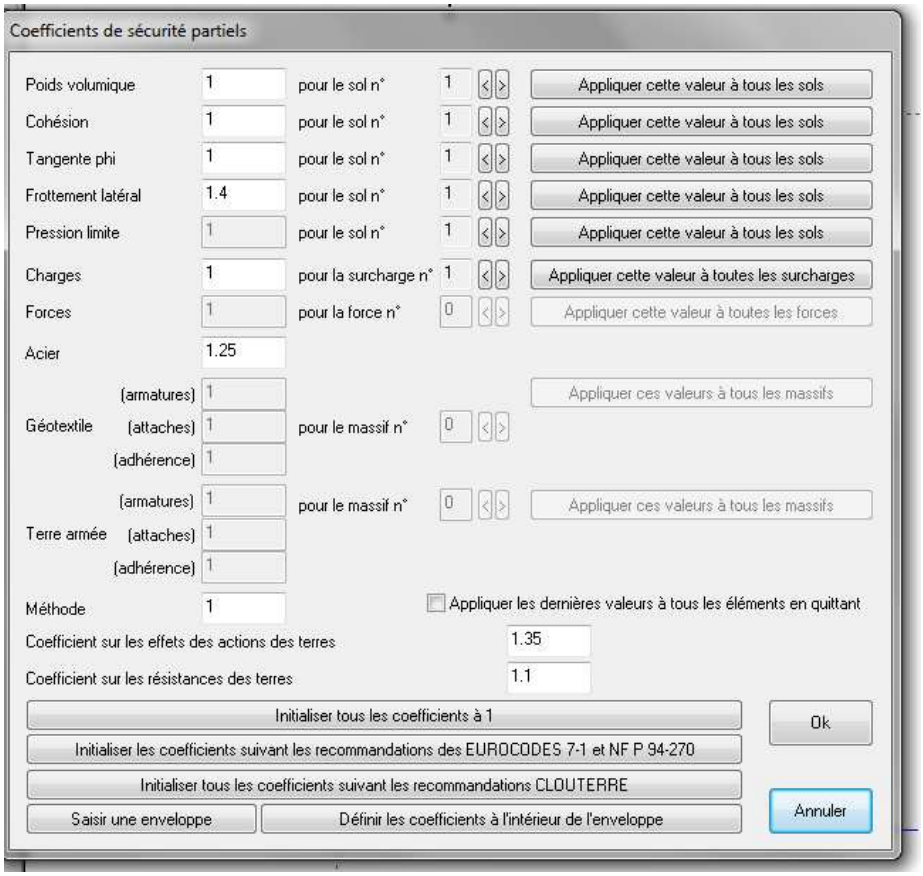


Figure 80 : Saisie des coefficients de sécurité partiels

Plusieurs choix sont mis à la disposition de l'utilisateur :
Soit en entrant les valeurs individuellement : pour chaque caractéristique de chaque objet.
Soit par catégorie d'objet considéré en cliquant respectivement sur le bouton en regard « Appliquer cette valeur à tous / à toutes… » :

- Attribuer le coefficient de sécurité partiel à tous les sols définis.
- Attribuer le même coefficient de sécurité partiel à toutes les charges définies.
- Attribuer le groupe de coefficients de sécurité partiel (armatures, attaches et adhérence) à l'ensemble des massifs géotextiles et/ou terre armée.
- La case à cocher « Appliquer les dernières valeurs à tous les éléments en quittant », lorsqu'elle est activée, permet de s'affranchir des clics sur chacun des boutons « Appliquer cette valeur à tous / toutes … ». La valeur affichée au niveau du paramètre à pondérer sera considérée pour l'ensemble des objets intégrant ce paramètre.

En utilisant les boutons placés en bas de la boîte de dialogue, l'utilisateur peut choisir :

- d'initialiser tous les coefficients à 1 (méthode traditionnelle),
- d'initialiser automatiquement les coefficients selon les recommandations CLOUTERRE,
- d'initialiser automatiquement les coefficients selon les recommandations de l'Eurocode 7.

Une boîte de dialogue apparaît (ci-dessous, selon CLOUTERRE ou les Eurocodes 7) et permet de sélectionner l'approche de calcul souhaitée :

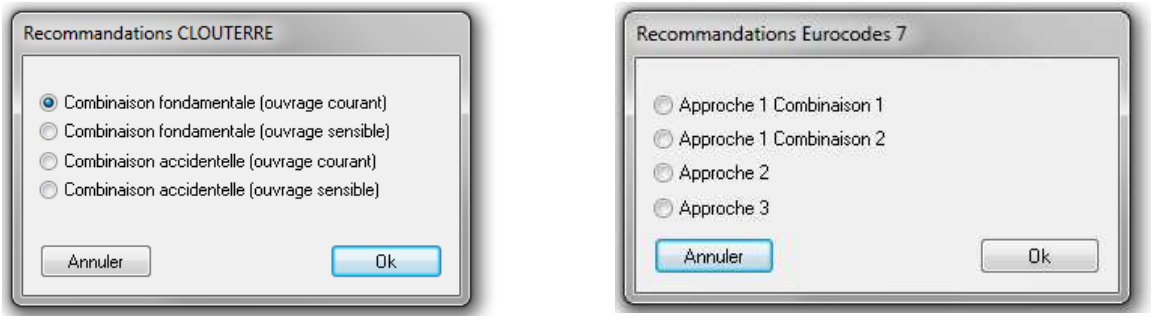


Figure 81 : Choix de la combinaison / approche de calcul

Sélectionner l'option choisie et valider par « OK » ou sinon cliquer sur « Annuler ». Les modifications seront prises en compte dans la boîte de dialogue précédente. Les approches de calculs et les coefficients partiels sont donnés au paragraphe 6.1 de la section « Considérations théoriques » et en Annexe C pour chacun des deux référentiels.
Dans le cas où les coefficients sont appliqués selon la norme d'application française des Eurocodes 7, la fenêtre suivante permet à l'utilisateur de choisir la répartition des forces et surcharges, et la modélisation des sols:

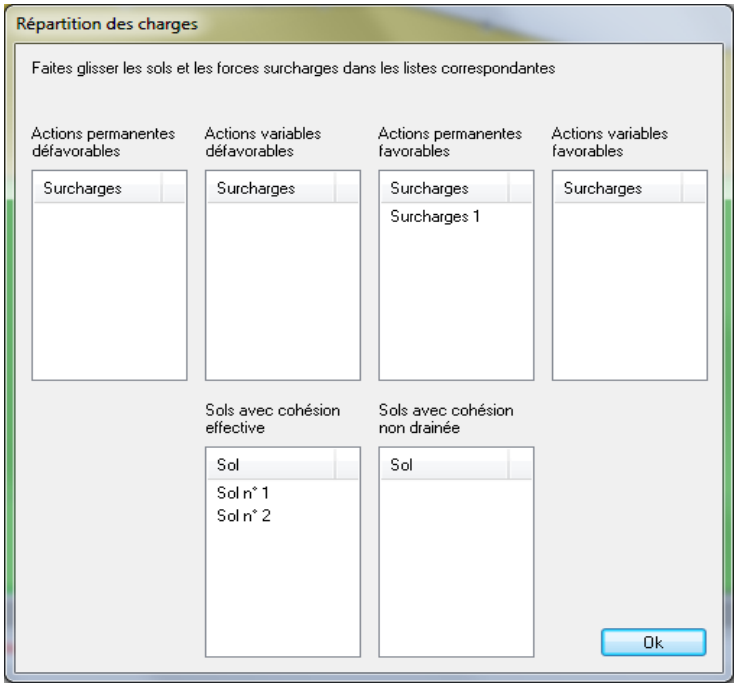


Figure 82 : Répartition des actions et des sols

Enfin, en cliquant sur le bouton « Saisir une enveloppe » et « Définir les coefficients à l'intérieur de l'enveloppe », il est possible de définir une enveloppe dans laquelle les coefficients de sécurité seront différents de ceux choisi à l'extérieur. Cette notion apparaît notamment dans l'annexe A de l'ancienne norme XP P 94-240 (annulée). Cette option, qui était principalement utilisée pour les ouvrages sur versant, permet de donner à un même paramètre des coefficients partiels différents à l'intérieur et à l'extérieur de l'enveloppe.
Remarques :
La saisie de l'enveloppe se fait graphiquement en commençant par l'extrémité aval de l'enveloppe à partir du TN (de manière identique à la création / à la modification de segments).
Les points courants ne correspondent pas forcément à des points de la géométrie

Sur le profil de sortie, l'enveloppe est présente en pointillés mauve, et les coefficients partiels compris dans l'enveloppe sont encadrés en rose (cf. figure suivante).

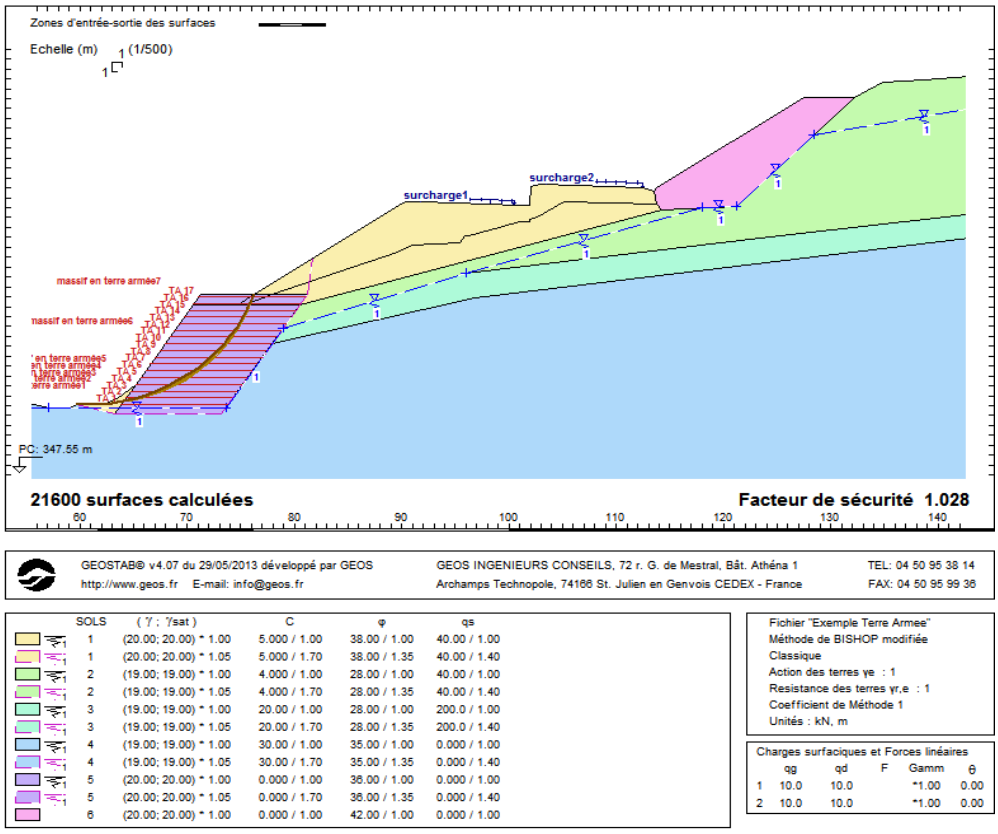

Zones d'entrée-sortie des surfaces
Echelle (m) 1 (1/500)
surcharge1
surcharge2
massif en terre armée7
massif en terre armée6
PC: 347.55 m
21600 surfaces calculées
Facteur de sécurité 1.028
GEOSTAB© v4.07 du 29/05/2013 développé par GEOS
http://www.geos.fr E-mail: info@geos.fr
GEOS INGENIEURS CONSEILS, 72 r. G. de Mestral, Bât. Athéna 1
Archamps Technopole, 74166 St. Julien en Genvois CEDEX - France
TEL: 04 50 95 38 14
FAX: 04 50 95 99 36
SOLS (γ ; γsat) C φ qs
1 (20.00; 20.00) * 1.00 5.000 / 1.00 38.00 / 1.00 40.00 / 1.00
1 (20.00; 20.00) * 1.05 5.000 / 1.70 38.00 / 1.35 40.00 / 1.40
2 (19.00; 19.00) * 1.00 4.000 / 1.00 28.00 / 1.00 40.00 / 1.00
2 (19.00; 19.00) * 1.05 4.000 / 1.70 28.00 / 1.35 40.00 / 1.40
3 (19.00; 19.00) * 1.00 20.00 / 1.00 28.00 / 1.00 200.0 / 1.00
3 (19.00; 19.00) * 1.05 20.00 / 1.70 28.00 / 1.35 200.0 / 1.40
4 (19.00; 19.00) * 1.00 30.00 / 1.00 35.00 / 1.00 0.000 / 1.00
4 (19.00; 19.00) * 1.05 30.00 / 1.70 35.00 / 1.35 0.000 / 1.40
5 (20.00; 20.00) * 1.00 0.000 / 1.00 36.00 / 1.00 0.000 / 1.00
5 (20.00; 20.00) * 1.05 0.000 / 1.70 36.00 / 1.35 0.000 / 1.40
6 (20.00; 20.00) * 1.00 0.000 / 1.00 42.00 / 1.00 0.000 / 1.00
Fichier "Exemple Terre Armee"
Méthode de BISHOP modifiée
Classique
Action des terres γe : 1
Resistance des terres γr,e : 1
Coefficient de Méthode 1
Unités : kN, m
Charges surfaciques et Forces linéaires
qg qd F Gamm θ
1 10.0 10.0 *1.00 0.00
2 10.0 10.0 *1.00 0.00

Figure 83 : Visualisation de l'enveloppe des coefficients partiels

3.10 Saisie des surfaces de rupture

A ce stade l'utilisateur peut définir les surfaces de rupture et le modèle de générations de celles-ci. Pour cela, sélectionner l'option « Surfaces de ruptures (modèles) » du menu « Préparation des données ». La boîte de dialogue ci-dessous apparaît :

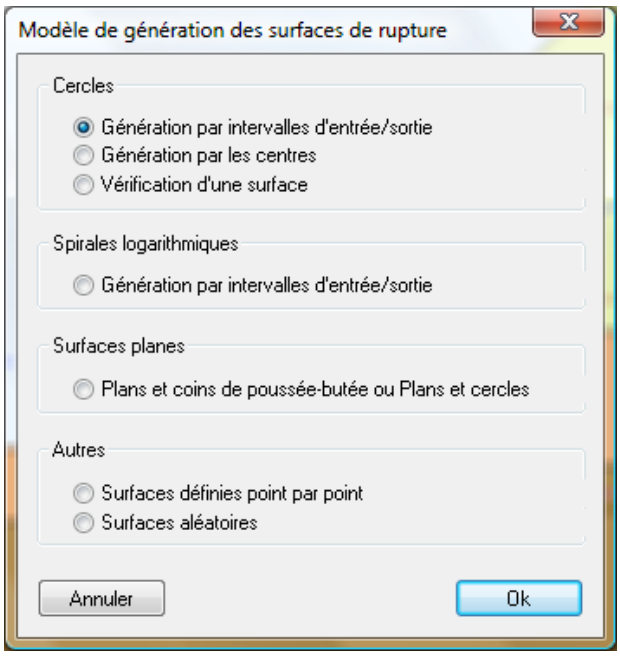


Figure 84 : Choix du modèle de surface de rupture

La boîte de dialogue laisse l'utilisateur choisir entre plusieurs types de surfaces :

- surfaces circulaires
- spirales logarithmiques
- surfaces planes
- autres : définies point par point ou surfaces aléatoires

La configuration des différents modèles sont décrits dans les paragraphes suivants.

Note : Pour modifier les surfaces de rupture, sélectionner l'option option du menu « Préparation des données », puis « Modifier les surfaces de rupture ». Si aucune surface de rupture n'est présente, la fenêtre ci-contre s'ouvrira.

Lorsque la méthode de Bishop est utilisée, les cercles de rupture générés n'ont pas de partie verticale (ou plus précisément parallèle à l'accélération locale) afin d'éviter les erreurs induites par la méthode de Bishop.

3.10.1 *Surfaces circulaires*

3.10.1.1 Génération par des intervalles d'entrées-sorties

Cliquer sur l'option « Génération par intervalles entrées-sorties ». La boîte de dialogue ci-dessous se présente.
Cette commande permet de générer de façon systématique les cercles géométriquement possibles passant par des zones aval et amont, qui sont repérées sur le terrain naturel. Hors applications spécifiques, il est préférable d'utiliser ce mode de recherche de surfaces de rupture.

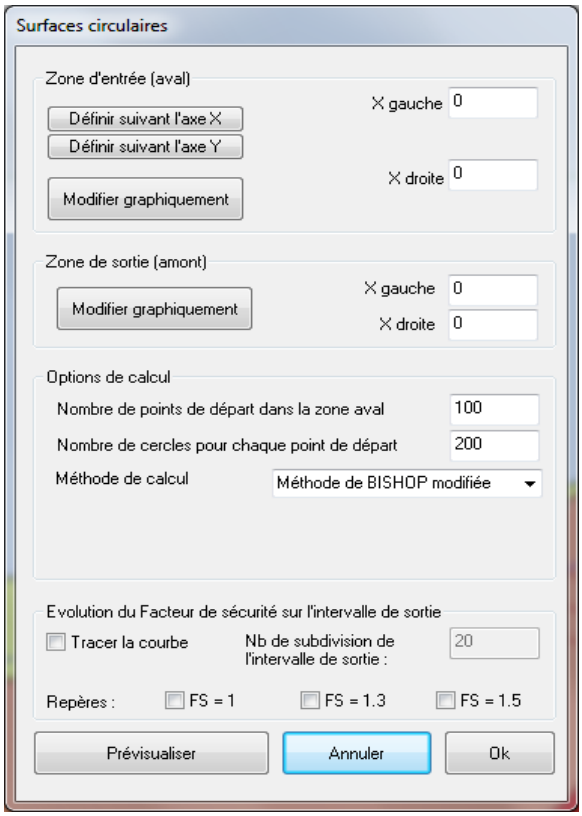


Figure 85 : Surfaces circulaires

Mode opératoire (graphique) :

a- Cliquer sur le bouton « Modifier graphiquement » de la zone d'entrée (aval). Un axe vertical coloré en vert se présente et est associé au déplacement du curseur. Suivant les déplacements, les valeurs des abscisses s'inscrivent dans la boîte de dialogue. Cliquer pour valider la valeur de l'abscisse gauche (X_{gauche}) de la zone d'entrée. *On peut également définir la zone d'entrée suivant l'axe Y.*

b- Déplacer l'axe vertical jusqu'à la droite de la zone. Une aire colorée en vert symbolise l'intervalle considéré : La valeur de la limite droite (X_{droite}) est ainsi connue. Cliquer pour valider cette valeur.

c- Répéter les actions a et b en cliquant sur le bouton « Modifier graphiquement » de la zone de sortie (amont). Cette zone n'est définissable qu'à la droite de la zone d'entrée.

d- Il ne reste plus qu'à saisir les valeurs restantes à savoir, le nombre de points de départ dans la zone aval et le nombre de cercles pour chaque point de départ (par défaut 100/200). Valider la procédure en cliquant sur le bouton « OK » ; sinon cliquer sur « Annuler ».

e- Choix de la méthode de calcul : pour les surfaces circulaires, choix entre la méthode de Bishop modifiée et la méthode des perturbations.

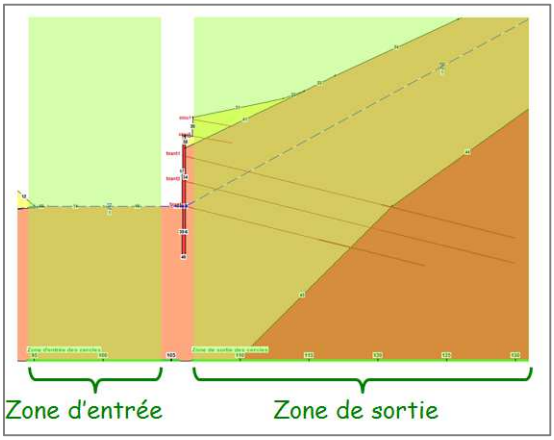


Figure 86 : Visualisation des zones d'entrée et sortie

Mode opératoire (manuel) :

a- Entrer directement les valeurs X_{gauche} et X_{droite} de l'intervalle de la zone entrée (aval).
Si les intervalles doivent être entrées par les ordonnées, cliquer sur le bouton « Définir suivant l'axe Y » et entrer les valeurs de Y_{bas} et Y_{haut}, ainsi que les segments du TN associés.

b- Entrer directement les valeurs X_{gauche} et X_{droite} (ou Y_{bas} et Y_{haut}) de l'intervalle de la zone de sortie (amont). Il est possible de cliquer sur le bouton « Pré visualiser » pour avoir un aperçu des intervalles définis.

Ces intervalles sont matérialisés par des segments colorés en vert (et en gras) disposés le long de l'axe horizontal bas des graduations de la zone de travail. Ils sont respectivement annotés par les mentions « zone d'entrée des cercles » et « zone de sortie des cercles ».

c- Les valeurs entrées par défaut peuvent être modifiées à savoir, le nombre de points de départ dans la zone aval et le nombre de cercles pour chaque point de départ. Valider la procédure en cliquant sur le bouton « OK » sinon cliquer sur « Annuler ».

Remarques :
La zone d'entrée aval doit être à gauche de la zone de sortie amont.
Les deux zones ne doivent pas se chevaucher.
La définition de la zone d'entrée aval des surfaces en altitude (y) est utile par exemple pour étudier les phases d'exécution de parois clouées sub-verticales.
Afin d'approcher au mieux la surface la plus défavorable, il ne faut pas hésiter à générer de nombreuses surfaces avec, pour chaque point de départ, de 200 à 500 surfaces.
L'utilisateur peut également, à partir d'un point de départ fixe et de façon systématique, générer les cercles géométriquement possibles sortant dans la zone amont (pourquoi avoir un point fixe, entrer la même valeur pour X_{gauche} et Y_{droit} de l'intervalle d'entrées/sorties).
Seules les 10 surfaces les plus défavorables sont affichées sur la représentation graphique.
La surface critique est affichée en trait gras.

Pour la définition des zones d'entrée aval et de sortie amont, l'utilisateur peut appliquer les règles AFPS qui précisent que la zone d'influence d'un talus s'étend conventionnellement en amont et en aval à 3 fois la hauteur de ce dernier respectivement à compter de sa crête et de son pied (cf. figures ci-dessous).

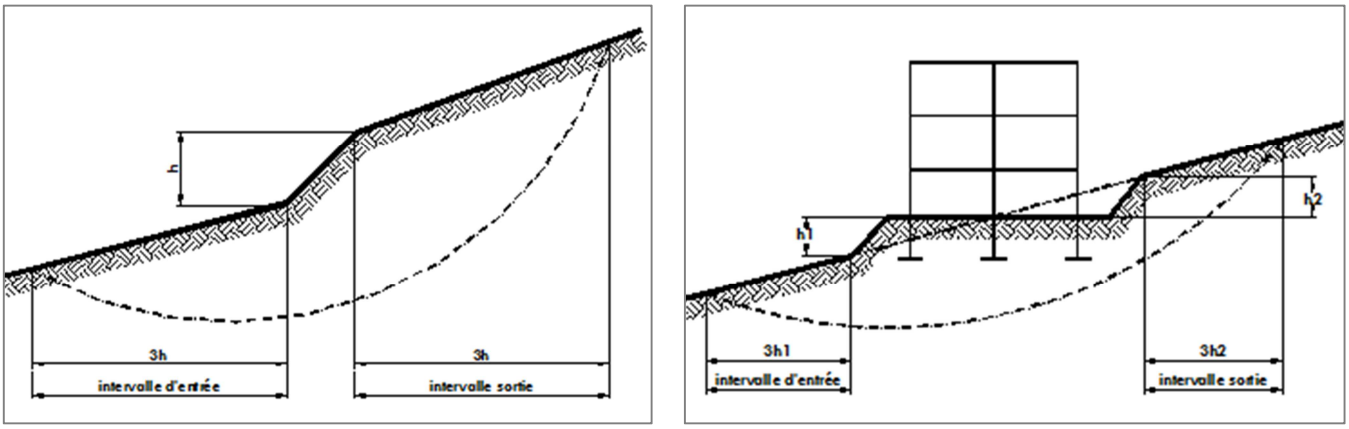


Figure 87 : Règles AFPS

Il est aussi possible de sortir un graphique de l'évolution du facteur de sécurité sur l'intervalle de sortie en fonction de la distance à la crête, en cochant la case « Tracer la courbe ». (cf. figure 88 suivante).
Cette option est disponible dans le cas de recherche de surfaces par intervalles d'entrées / sorties (cercles, spirales logarithmiques, surfaces aléatoires). Le cadre suivant s'affiche alors en bas de la fenêtre de configuration des intervalles :

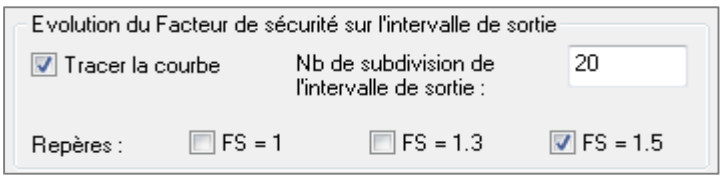

Evolution du Facteur de sécurité sur l'intervalle de sortie
Tracer la courbe
Nb de subdivision de l'intervalle de sortie :
20
Repères :
FS = 1
FS = 1.3
FS = 1.5

Figure 88 : Evolution de FS sur l'intervalle de sortie

Il permet de tracer le graphique FS = f(distance à la crête de talus) en repérant notamment les FS choisis. L'intervalle de sortie est subdivisé en n intervalles élémentaires.

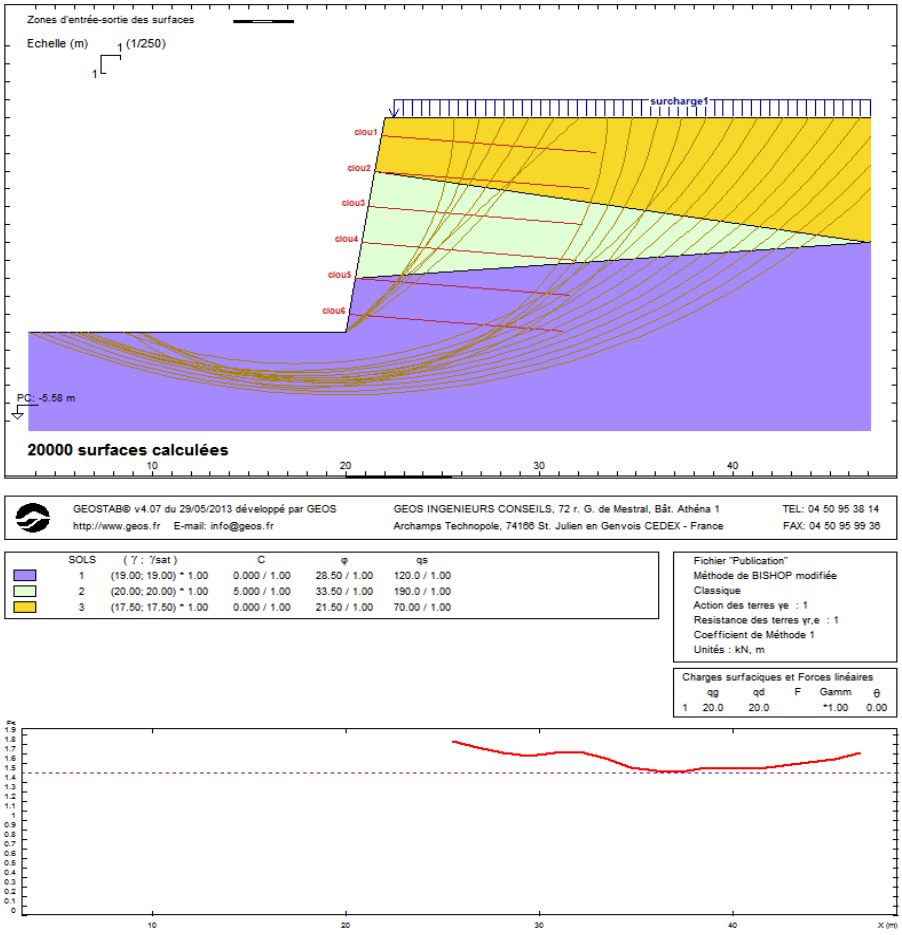

Zones d'entrée-sortie des surfaces
Echelle (m)
1 (1/250)
1
surcharge1
clou1
clou2
clou3
clou4
clou5
clou6
PC: -5.58 m
20000 surfaces calculées
10
20
30
40
GEOSTAB® v4.07 du 29/05/2013 développé par GEOS
http://www.geos.fr E-mail: info@geos.fr
GEOS INGENIEURS CONSEILS, 72 r. G. de Mestral, Bât. Athéna 1
Archamps Technopole, 74166 St. Julien en Genvois CEDEX - France
TEL: 04 50 95 38 14
FAX: 04 50 95 99 36
SOLS (γ ; γsat) C φ qs
1 (19.00; 19.00) * 1.00 0.000 / 1.00 28.50 / 1.00 120.0 / 1.00
2 (20.00; 20.00) * 1.00 5.000 / 1.00 33.50 / 1.00 190.0 / 1.00
3 (17.50; 17.50) * 1.00 0.000 / 1.00 21.50 / 1.00 70.00 / 1.00
Fichier "Publication"
Méthode de BISHOP modifiée
Classique
Action des terres γe : 1
Resistance des terres γr,e : 1
Coefficient de Méthode 1
Unités : kN, m
Charges surfaciques et Forces linéaires
qg qd F Gamm θ
1 20.0 20.0 *1.00 0.00
Fs
X (m)

Figure 89 : Résultats - Evolution Fs

3.10.1.2 *Génération par les centres*

Cette approche de génération de cercles par leur centre est classique. Cependant, elle ne permet pas d'obtenir systématiquement les surfaces les plus défavorables.

Cliquer sur l'option « Génération par les centres ». La boîte de dialogue ci-dessous se présente. Il faut définir la boîte dans laquelle se trouvent les centres des surfaces à calculer. Les rayons maximum et minimum sont automatiquement calculés : les rayons des surfaces doivent donc être compris entre ces deux valeurs. Les rayons minimum et maximum sont saisis par l'utilisateur et ce sont les rayons intermédiaires qui sont calculés.

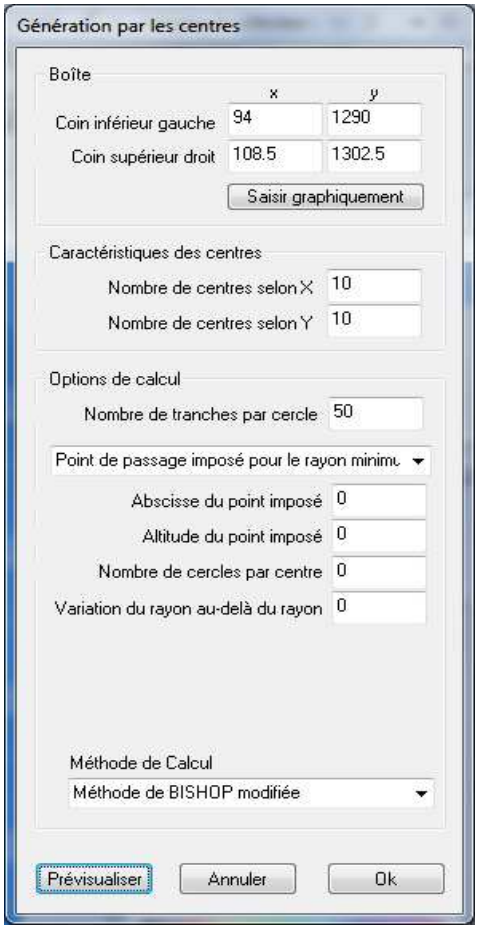


Figure 90 : Génération par les centres

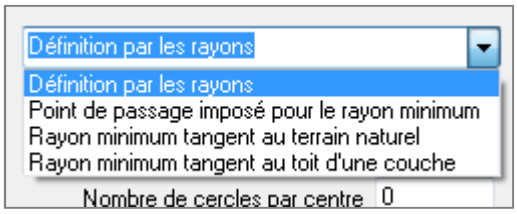
Mode opératoire (graphique):

a- Cliquer sur le bouton « Saisir graphiquement ». Le curseur est alors matérialisé par un pointeur accompagné d'un label « Boîte des centres » sur la zone graphique. Cliquer pour saisir les coordonnées du premier coin (coin inférieur gauche).

b- Glisser pour étendre la taille du cadre ainsi créé. Cliquer pour saisir les coordonnées du second coin (coin supérieur droit).

c- Entrer successivement les valeurs des caractéristiques des centres.

d- Entrer les options de calcul, le nombre de tranches par cercle ainsi que les champs correspondants, sachant que les champs disponibles varient selon les modes de calcul sélectionnés dans la liste déroulante (présentées ci–dessous).


Définition par les rayons
Définition par les rayons
Point de passage imposé pour le rayon minimum
Rayon minimum tangent au terrain naturel
Rayon minimum tangent au toit d'une couche
Nombre de cercles par centre
0

e- Sélectionner la méthode de calcul : la méthode de Bishop modifiée ou la méthode des perturbations.

Les 4 modes de calculs et les champs à compléter associés sont donnés dans les figures ci-dessous.

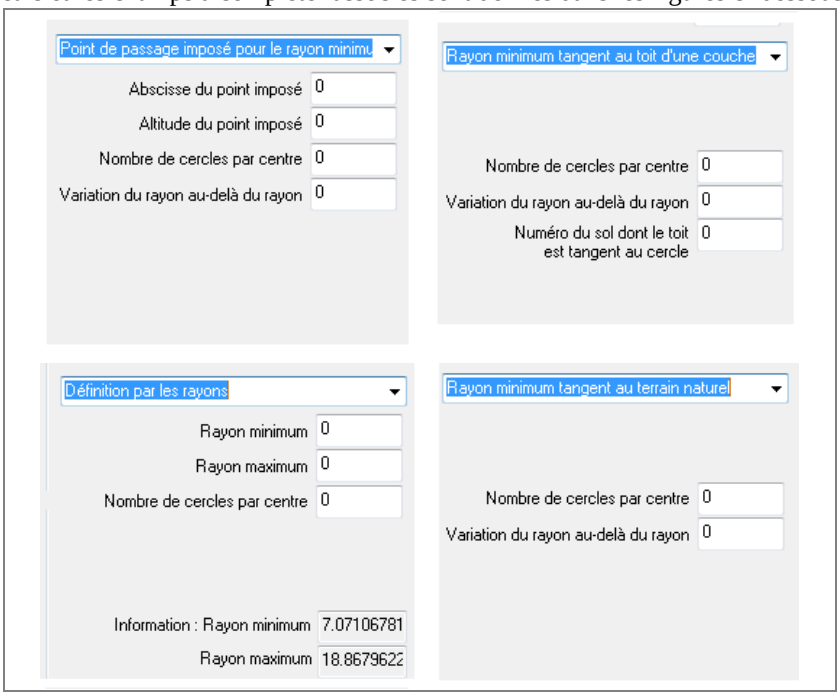


Figure 91 : Modes de calculs – Génération par les centres

La génération de surfaces de rupture par les centres peut également être configurée manuellement.
Mode opératoire (manuel):

a- Entrer toutes les valeurs pour chaque groupe de paramètres. Dans la zone « Options de calcul », sélectionner le mode de calcul approprié parmi les cas disponibles (cas 1 à cas 4) et renseigner les cases spécifiques à ce mode.

b- Cliquer sur le bouton « Pré visualiser » pour avoir un aperçu graphique de la boîte de centre définie. Si les données saisies sont correctes, cliquer sur le bouton « OK » pour clôturer cette procédure sinon cliquer sur « Annuler ».

Remarque :
Suivant le nombre de tranches retenues par cercle, les résultats obtenus peuvent être très différents. Avec peu de tranches, on trouve rarement le cercle le plus critique.

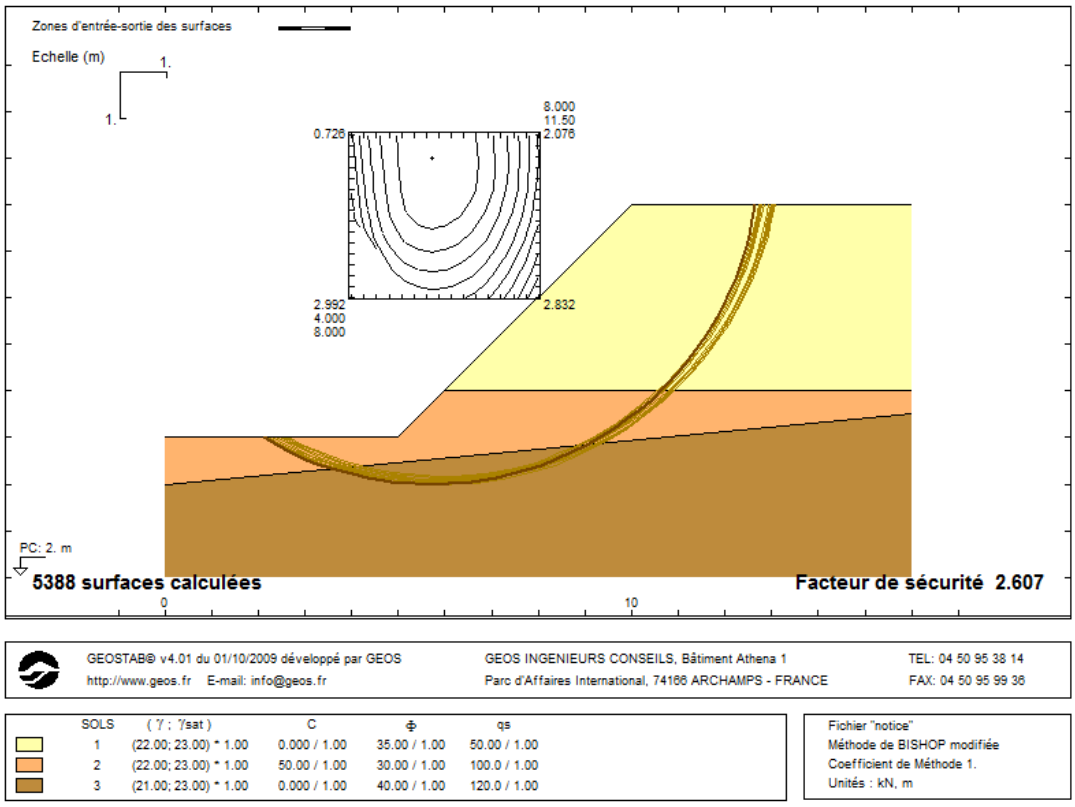

Zones d'entrée-sortie des surfaces
Echelle (m)
1.
1.
8.000
11.50
2.076
0.726
2.992
4.000
8.000
2.832
PC: 2. m
5388 surfaces calculées
Facteur de sécurité 2.607
0
10
GEOSTAB© v4.01 du 01/10/2009 développé par GEOS
http://www.geos.fr E-mail: info@geos.fr
GEOS INGENIEURS CONSEILS, Bâtiment Athena 1
Parc d'Affaires International, 74166 ARCHAMPS - FRANCE
TEL: 04 50 95 38 14
FAX: 04 50 95 99 36
SOLS (γ ; γsat) C Φ qs
1 (22.00; 23.00) * 1.00 0.000 / 1.00 35.00 / 1.00 50.00 / 1.00
2 (22.00; 23.00) * 1.00 50.00 / 1.00 30.00 / 1.00 100.0 / 1.00
3 (21.00; 23.00) * 1.00 0.000 / 1.00 40.00 / 1.00 120.0 / 1.00
Fichier "notice"
Méthode de BISHOP modifiée
Coefficient de Méthode 1.
Unités : kN, m

Figure 92 : Résultats - cercles de rupture selon les centres

Remarques :
La carte des centres est décalée en X et Y pour apparaître sur la figure. L'échelle de cette boîte est déformée.
Vérification : le minimum doit être encadré par les 4 coins de la boîte.

3.10.1.3 *Vérification d'une surface*

Cette commande permet la vérification du coefficient de sécurité d'une surface de rupture circulaire donnée . Cliquer sur l'option « Vérification d'une surface ». La boîte de dialogue ci-contre se présente.

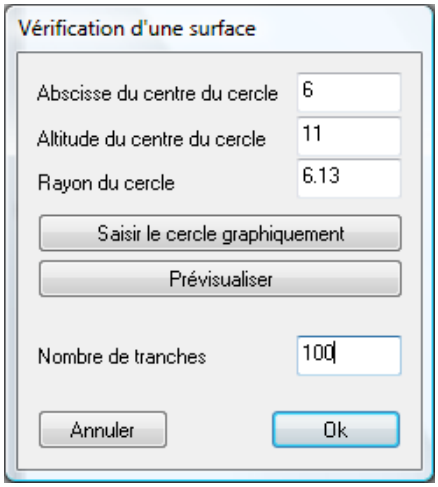


Figure 93 : Vérification d'une surface

Mode opératoire :

a- Cliquer sur le bouton « Saisir le cercle graphiquement ». Une croix colorée en vert se présente. Elle symbolise le centre du cercle. Déplacer la croix vers la position souhaitée. Cliquer pour saisir les coordonnées du centre.

b- Glisser et cliquer pour valider la valeur du rayon du cercle. Le cercle est ainsi dessiné.

c- Préciser le nombre de tranches souhaité.

d- Pour saisir les coordonnées du cercle manuellement, il faut entrer respectivement chacune des propriétés. Cliquer sur le bouton « Pré visualiser » pour avoir un aperçu du nouveau tracé du cercle ; sinon sur « Annuler ».

Note : Pour modifier le cercle graphiquement, cliquer de nouveau sur « Saisir le cercle graphiquement », et le cercle défini précédemment reste visible jusqu'au moment où les nouvelles valeurs du centre du cercle ainsi que son rayon, sont validées.

3.10.2 *Spirales logarithmiques*

La génération de ces surfaces s'effectue sur le même principe que pour les surfaces circulaires en utilisant les intervalles d'entrées / sorties.
Suivant la position de la zone d'entrée aval des spirales, l'utilisateur doit définir la classe de spirales à étudier. Cette classe dépend du signe de la constante de la spirale logarithmique (positive ou négative).

Nota : Compte tenu des contraintes géométriques fixées (zone d'entrée aval, zone d'entrée amont), il est souvent impossible de trouver des spirales logarithmiques respectant ces contraintes. Dans ce cas, il faut fixer des intervalles d'entrées – sorties moins restrictifs ou changer la forme de spirale à étudier.
Cliquer sur l'option « Génération par intervalles entrées-sorties » du cadre de saisie « Surfaces logarithmiques ». La boîte de dialogue ci-dessous se présente.

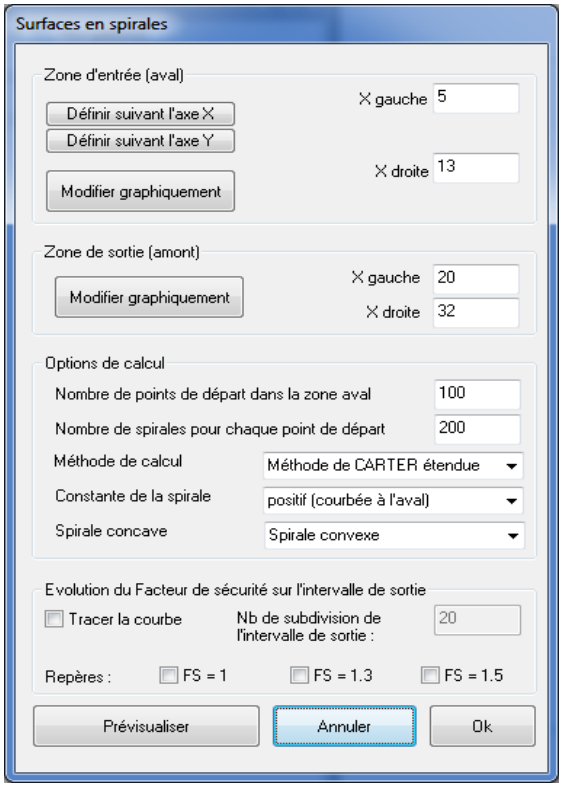

Surfaces en spirales
Zone d'entrée (aval)
Définir suivant l'axe X
Définir suivant l'axe Y
Modifier graphiquement
X gauche 5
X droite 13
Zone de sortie (amont)
Modifier graphiquement
X gauche 20
X droite 32
Options de calcul
Nombre de points de départ dans la zone aval 100
Nombre de spirales pour chaque point de départ 200
Méthode de calcul Méthode de CARTER étendue
Constante de la spirale positif (courbée à l'aval)
Spirale concave Spirale convexe
Evolution du Facteur de sécurité sur l'intervalle de sortie
Tracer la courbe
Nb de subdivision de l'intervalle de sortie : 20
Repères : FS = 1 FS = 1.3 FS = 1.5
Prévisualiser
Annuler
Ok

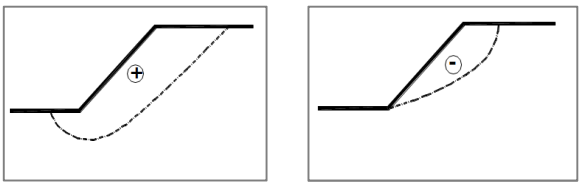
Figure 94 : Surfaces en spirales

Les seules différences entre les boîtes de dialogue, liées respectivement à la définition de surfaces circulaires de rupture en mode intervalles entrées/sorties et spirale logarithmique, résident dans le module « Options de calcul » :

L'utilisateur a la possibilité de choisir parmi les méthodes suivantes :

- Méthode de Carter simple,
- Méthode de Carter étendue,
- Méthode des perturbations.

Il est nécessaire de définir le signe de la constante de la spirale d'équation $r = a^{\theta}$ (voir figures ci-dessous).



Enfin il convient de définir la concavité :

- spirales convexes (centre vers le haut) : pour la stabilité des pentes,
- spirales concaves (centre vers le bas) : pour la méthode de Kranz.

3.10.3 *Surfaces planes*

Ces surfaces de rupture sont définies par des boîtes à l'intérieur desquelles est imposé le passage des surfaces de rupture. Les surfaces sont constituées de plans donc de droites sur le profil reliant les points dans les boîtes et d'autres surfaces, comme des cercles ou des coins de poussée-butée, aux extrémités. Les points dans les boîtes sont générés de façon aléatoire. Les boîtes sont définies de la façon suivante :

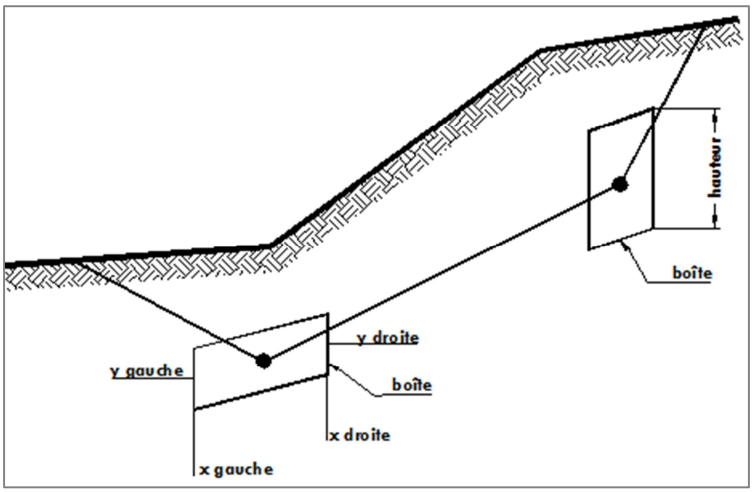


Figure 95 : Boite de passage imposé d'une surface

Pour la définition des surfaces de ruptures planes, deux options s'offrent à vous ;

- Par plans et coins de poussée – butée
- Par plans et cercles

Ces options sont décrites dans les paragraphes suivants.

3.10.3.1 Plans et coins de poussée - butée

Les surfaces générées sont constituées de plans entre les boîtes et de coins de poussée-butée aux extrémités.
La boîte de dialogue de définition des boîtes (ci-dessous) apparaît.

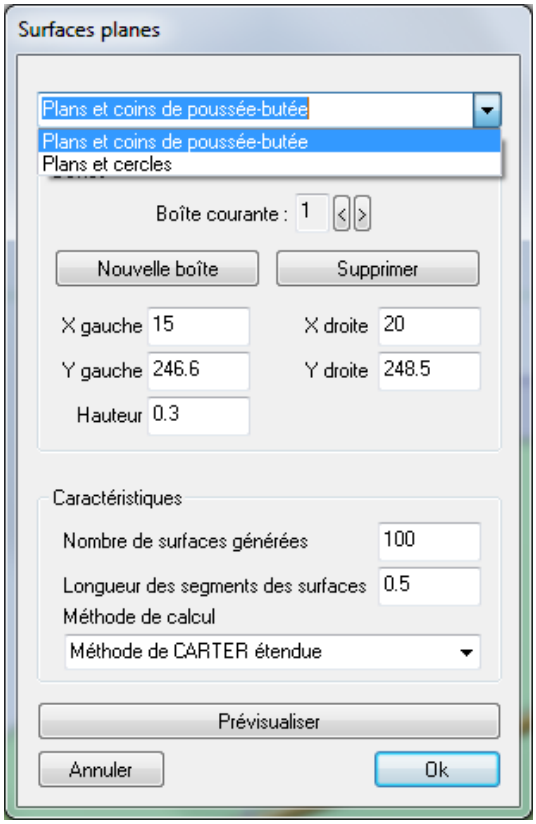


Figure 96 : Plans et coins - Poussée Butée

Mode opératoire :

a- Cliquer sur le bouton « Nouvelle boîte ». Un curseur coloré en vert se présente pour la saisie de la première extrémité gauche de l'axe de la boîte. Cliquer pour valider.

b- Un autre curseur est mis à disposition pour la saisie de l'extrémité droite de l'axe de la boîte. Cliquer à nouveau pour valider.

c- Déplacer le curseur en hauteur pour élargir ou rétrécir la hauteur du parallélogramme ainsi constitué. Les propriétés de la boîte s'inscrivent dans la boîte de dialogue. Cliquer pour sauver.

d- Il ne reste plus qu'à saisir le nombre de surfaces générées et la longueur des segments des surfaces (pas de discrétisation entre le TN et la première boîte ; ainsi qu'entre la dernière boite et le TN). Répéter les actions de a à d autant de fois qu'il y a de boîte à saisir.

e- Pour modifier manuellement une ou plusieurs boîtes dans chaque mode, il faut modifier les coordonnées et les paramètres de la boîte et cliquer sur le bouton « Prévisualiser » pour avoir un aperçu graphique de la saisie. Si les valeurs saisies sont correctes, cliquer sur le bouton « OK » pour valider sinon cliquer sur le bouton « Annuler ».

Comme les points dans les boîtes sont générés de façon aléatoire, si les boîtes sont trop grandes, il faudra calculer un nombre important de surfaces. Avec de grandes boîtes, on trouve rarement les plans les plus critiques.

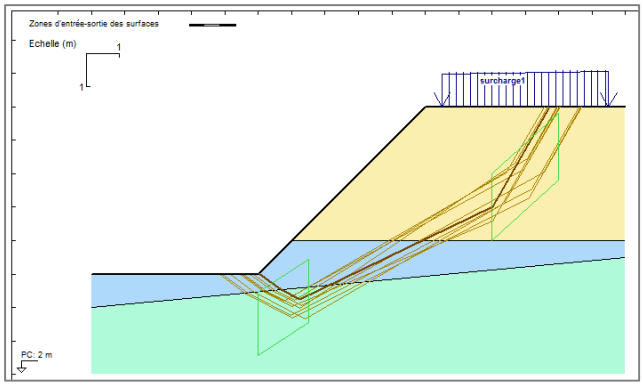


Figure 97 : Visualisation - Surfaces par plans et coins

Les coins de poussée-butée sont inclinés à $(\frac{\pi}{4}+\frac{\phi}{2})$ et $(\frac{\pi}{4}-\frac{\phi}{2})$ respectivement avec ϕ correspondant à l'angle de frottement de chaque sol, ce qui induit des changements de pente aux interfaces.

3.10.3.2 Plans et cercles

Le mode opératoire est similaire à la génération de surfaces de ruptures par coins et coins de poussée – butée. La différence étant que les surfaces générées sont constituées d'arcs de cercle aux extrémités. La boîte de dialogue est sensiblement identique (la longueur des segments n'est plus à définir).

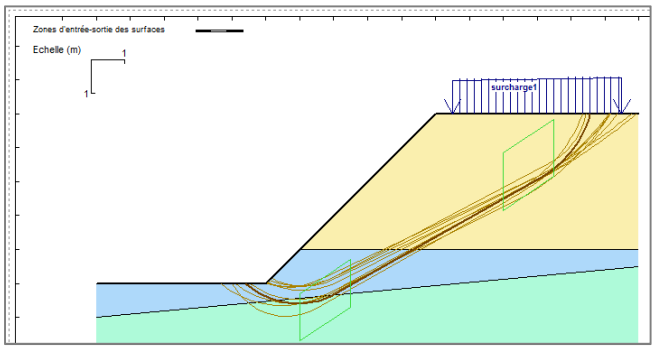


Figure 98 : Visualisation – Surfaces par plans et cercles

Remarques communes à la recherche de surfaces planes par boîte :
Les boîtes ne doivent pas se chevaucher en X, ni être définie au-delà du TN.
Pour avoir un point de passage obligé, il suffit de rentrer des coordonnées de milieu bord gauche et droite identiques pour une même boîte.

3.10.4 *Surfaces définies point par point*

Depuis « préparation des données » puis « Surfaces de rupture (modèles) », dans « Autres»
Sélectionner l'option « Surface définie par des points ». La fenêtre suivante apparaît.

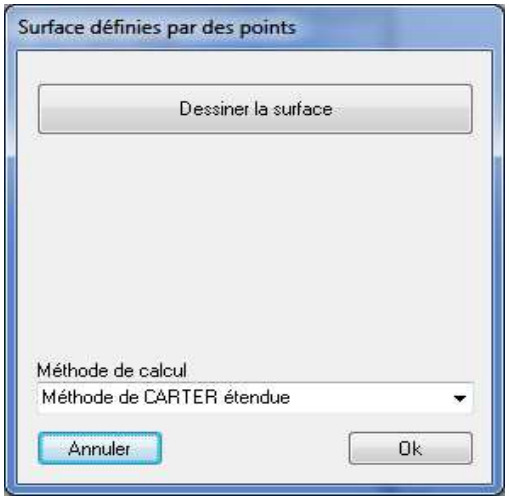


Figure 99 : Surfaces point par point

Mode opératoire :

a- Une croix verte se présente en attente de la saisie du premier point (présent sur le TN) de la surface souhaitée. Cliquer pour saisir ce premier point.

b- Déplacer le curseur sous le TN et cliquer pour valider ce point suivant.
Répéter l'action b de manière à ce que la surface (obtenue après le calcul) soit incluse dans la zone polygonale qui doit être délimitée.
Le dernier point devra être de nouveau sur le TN pour valider la saisie complète.

c- Choisir la méthode de calcul

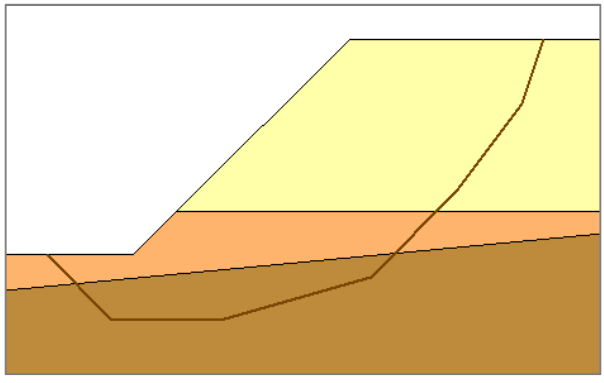


Figure 100 : Visualisation - Surface point par point

Remarques :
Les points doivent être ordonnés de gauche à droite.
Le nombre de points est limité à 100, une seule surface est calculée.
L'utilisateur doit s'assurer que le mécanisme est cinématiquement admissible.

3.10.5 *Surfaces aléatoires*

Depuis « préparation des données » puis « Surfaces de rupture (modèles) », dans « Autres», sélectionner l'option « Surfaces aléatoires ». La boite de dialogue qui apparait correspond à une configuration par intervalles d'entrées / sorties : le mode opératoire est analogue à la recherche de cercles ou de spirales (voir paragraphes correspondants).

Les intervalles d'entrée et de sortie doivent être définis de la gauche vers la droite en cliquant avec la souris. Une fois la saisie effectuée, choisir la méthode de calcul. En cas d'erreur, recommencer l'opération depuis le début.

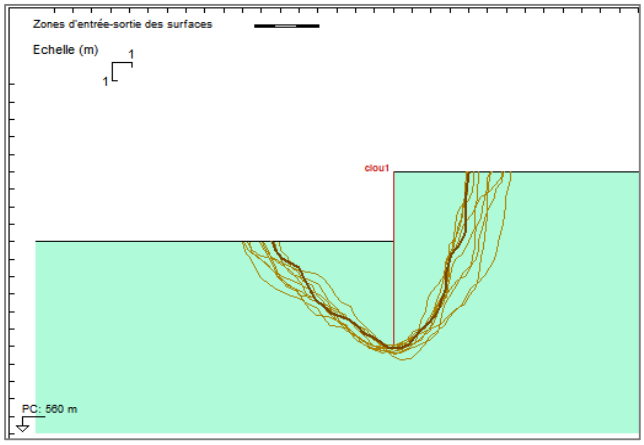


Figure 101 : Résultats - Surfaces aléatoires

En cas d'anisotropie des caractéristiques mécaniques, les surfaces de rupture préférentielles n'ont pas de forme géométrique simple (cercle, spirale, droite) mais suivent les directions de caractéristiques mécaniques faibles. Seule la recherche aléatoire permet de mettre en évidence de telles surfaces.

Remarques :
Les points doivent être ordonnés de gauche à droite.
Le nombre de points est limité à 100.
L'utilisateur doit s'assurer que le mécanisme est cinématiquement admissible.

3.10.6 *Méthode de calcul*

Les commandes de génération de surfaces de ruptures utilisent des méthodes de calcul par défaut :

- Cercles : méthode de Bishop modifiée,
- Surfaces planes : méthode de Carter étendue,
- Spirales et surfaces mixtes : méthode de Carter étendue,
- Surfaces point par point : méthode de Carter étendue,
- Surfaces aléatoires : méthode de Carter étendue.

Remarques :
Les méthodes de Bishop modifiée et de Carter étendue donnent des résultats identiques pour des surfaces circulaires.
La méthode de Carter simple, qui ne tient pas compte de la position du point par rapport auquel on écrit l'équilibre des moments, est systématiquement plus défavorable que la méthode de Carter étendue. Cependant, elle permet de retrouver l'approche manuelle de la stabilité pour les surfaces mixtes avec les coins de poussée-butée.

La méthode des perturbations permet de corriger la contrainte normale σ0 calculée par une méthode simple et de vérifier les 3 équations de base (équilibre horizontal, vertical et des moments) tranche par tranche.

Les méthodes de Bishop, Carter et la méthode des perturbations sont développées dans la suite du manuel (section « Considérations théoriques »).

4. Outils (Fonctions d'aide à la saisie)

4.1 Fonctions sur les objets

4.1.1 *Modifier un objet*

Cette fonction est disponible depuis l'option « Modifier un objet » du menu « Outils » ou depuis la barre d'outils en cliquant sur l'icône . Le curseur prendra la forme d'un petit carré en attente d'une sélection d'un objet.

Mode opératoire :
a- Se placer en mode modification comme précisé ci-dessus.
b- Survoler un objet présent sur la zone de travail, ce dernier apparaîtra en surbrillance rouge, signifiant qu'il est sélectionnable.
c- Cliquer pour afficher la boîte de dialogue correspondante qui a été utilisée pour créer l'objet.
d- Effectuer les modifications, fermer la boîte de dialogue en question.
e- Répéter les actions b à d autant de fois qu'il y a d'objets à modifier.
f- En cas de superposition de plusieurs objets actifs ou inactifs, un menu apparaitra avec la liste des possibilités des objets à modifier.

4.1.2 *Reproduire les caractéristiques d'un objet*

Cette fonction est disponible depuis l'option « Reproduire les caractéristiques d'un objet » du menu « Outils ».
Application : sur inclusions, surcharges.

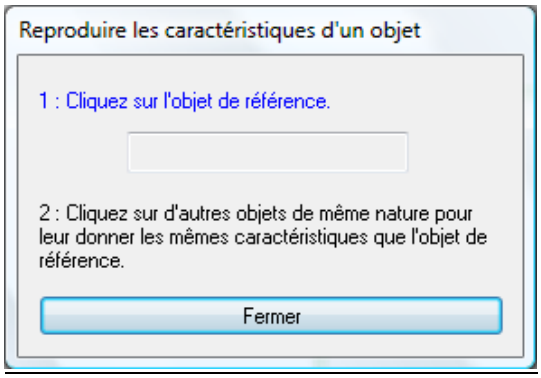

Reproduire les caractéristiques d'un objet
1 : Cliquez sur l'objet de référence.
2 : Cliquez sur d'autres objets de même nature pour leur donner les mêmes caractéristiques que l'objet de référence.
Fermer

Figure 102 : Reproduction des caractéristiques d'un objet

Mode opératoire :
a- Cliquer sur l'option de menu précisée précédemment. La fenêtre ci-contre apparaît et le curseur est matérialisé par un carré surmonté de la mention « REF », en attente d'une sélection. A noter que le mode opératoire à suivre est précisé coloré en bleu.

b- Cliquer sur un objet existant dans le profil. Le type d'objet et le numéro de l'objet est renseigné dans la zone de texte de la fenêtre.

c- Cliquer sur l'objet cible de même nature que celui choisi comme référence, pour les changements de propriétés soient pris en compte (Si l'objet est de même nature, il sera coloré en rouge).

d- Répéter l'action **c** autant de fois qu'il y a d'objets cibles sur le profil.

e- Cliquer sur le bouton « Fermer » pour cesser d'utiliser la fonction.

4.1.3 *Supprimer des objets*

Cette fonction est disponible depuis l'option « Supprimer des objets » du menu « Outils » ou depuis la barre d'outils en cliquant sur l'icône correspondante. Le curseur prendra la forme d'une petite croix en attente d'une sélection d'un objet.

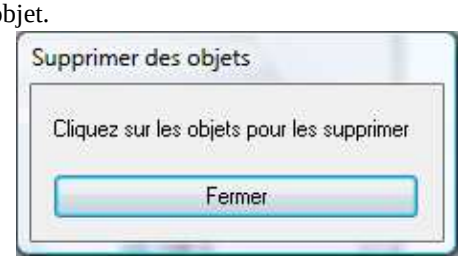


Figure 103 : Suppression d'objet

Mode opératoire :
a- Se mettre en mode suppression comme précisé ci-dessus.
b- Survoler un objet présent sur la zone de travail, ce dernier apparaîtra en surbrillance rouge, signifiant qu'il est sélectionnable.
c- Cliquer pour effacer cet objet.
d- Répéter les actions **b** et **c** autant de fois qu'il y a d'objets à effacer.
e- Pour finir, cliquer sur le bouton « Fermer »

4.1.5 *Activer/Désactiver des objets*

Cette fonction est disponible depuis l'option « Activer/Désactiver des objets pour la phase » du menu « Outils » ou depuis la barre d'outils en cliquant sur l'icône correspondante. Le curseur prendra la forme d'une petite croix en attente d'une sélection d'un objet.

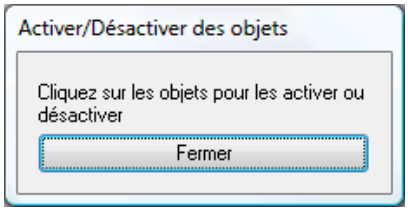


Figure 104 : Activer/Désactiver un objet

Mode opératoire :
a- Se mettre en mode Activation/Désactiver comme précisé ci-dessus, tous les objets (actifs ou inactifs) sont alors visible.
b- Survoler un objet présent sur la zone de travail, ce dernier apparaîtra en surbrillance rouge, signifiant qu'il est sélectionnable.
c- Cliquer pour activer un objet si celui-ci est désactivé et vice-versa cet objet.
d- Répéter les actions b et c autant de fois qu'il y a d'objets à activer ou désactiver.
e- Pour finir, cliquer sur le bouton « Fermer »

Il est possible de rendre visibles ou non les objets désactivés grâce à l'option « Voir les éléments inactifs » du menu « Affichage ».

4.2 Opérations dans le journal

4.2.1 *Annuler la dernière opération*

Cette fonction est disponible depuis l'option « Annuler la dernière opération » du menu « Outils » ou depuis la barre d'outils en cliquant sur l'icône . Cette fonction permet de placer dans l'état précédant la dernière opération, dans la session de travail en cours.
Cette étape peut être répétée autant de fois qu'il y a eu d'actions nécessaires à la construction du schéma sur la zone de travail, dans la session de travail en cours, dans la limite de 50.

4.2.2 *Rétablir la dernière opération*

Cette fonction est disponible depuis l'option « Rétablir la dernière opération » du menu « Outils » ou depuis la barre d'outils en cliquant sur l'icône . Cette fonction permet de rétablir les dernières opérations qui auraient été précédemment annulées par la fonction « Annuler la dernière opération », dans la session de travail en cours.
Cette étape peut être répétée autant de fois qu'il y a eu d'actions annulées lors de la construction du schéma sur la zone de travail, dans la session de travail en cours.
L'annulation, suivie d'une nouvelle action de construction, ne permet pas le rétablissement d'actions.

4.3 Mesure des distances

Cette fonction est disponible depuis l'option « Mesurer des distances sur le dessin » du menu « Outils » ou depuis la barre d'outils en cliquant sur l'icône .

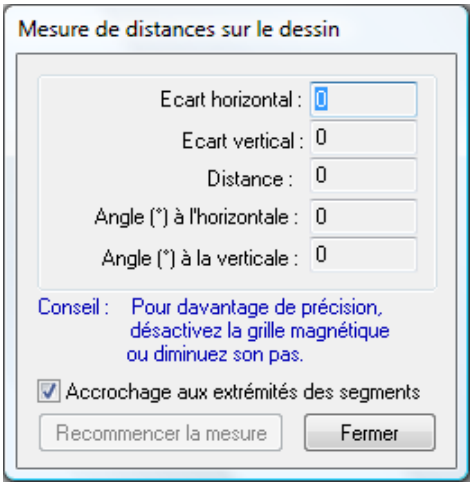

Mesure de distances sur le dessin
Ecart horizontal : 0
Ecart vertical : 0
Distance : 0
Angle (°) à l'horizontale : 0
Angle (°) à la verticale : 0
Conseil : Pour davantage de précision, désactivez la grille magnétique ou diminuez son pas.
Accrochage aux extrémités des segments
Recommencer la mesure
Fermer

Figure 105 : Mesures de distances

Mode opératoire :

a- Activer l'option de menu ou cliquer sur l'icône précisée précédemment. La fenêtre ci-contre apparaîtra et sera accompagnée d'un curseur constitué d'une croix et d'un symbole règle.

b- Déplacer le curseur vers la première extrémité du segment à mesurer n'importe où sur le dessin. Il est possible d'utiliser l'accrochage aux extrémités des segments de profil préexistants. Cliquer pour passer à la deuxième extrémité.

c- A ce stade un segment rouge matérialise la distance qui est mesurée sur le dessin. Les valeurs des écarts horizontal et vertical ainsi que la distance et les angles par rapport à l'horizontale et la verticale sont calculés et mis à jour suivant le déplacement du curseur. Choisir la deuxième extrémité et cliquer pour valider la position. La distance souhaitée sera ainsi affichée. Pour recommencer la procédure il faut cliquer sur le bouton « Recommencer la mesure », sinon cliquer sur le bouton « Fermer » pour cesser d'utiliser la fonction.

4.4 Fonctions sur le profil

4.4.1 *Transformer le profil*

Cette fonction est disponible depuis l'option « Transformer le profil » du menu « Outils ».
Une fenêtre apparaît (fig.4441a) pour permettre à l'utilisateur de choisir parmi plusieurs transformations possibles, à savoir : la translation horizontale et verticale, l'inversion (renversement horizontal), le prolongement et la troncature du profil.

Figure 106 : Transformation du profil

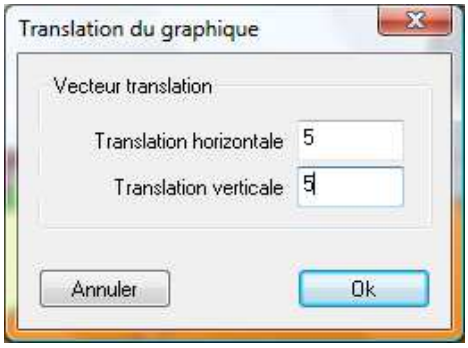


Figure 107 : Translation

Mode opératoire :
Cliquer l'un des boutons de la fenêtre pour la transformation souhaitée.

Cas de la translation : En cliquant sur le bouton « Translater le profil », la fenêtre de translation s'affiche et laisse à l'utilisateur la possibilité d'entrer les valeurs de translation horizontale et/ou verticale. Valider en cliquant sur le bouton « OK » ; sinon cliquer sur le bouton « Annuler ».

Cas de l'inversion de profil : En cliquant sur le bouton « Inverser le profil », la transformation en miroir horizontal s'effectue immédiatement, et vice-versa. La figure illustre le résultat obtenu.

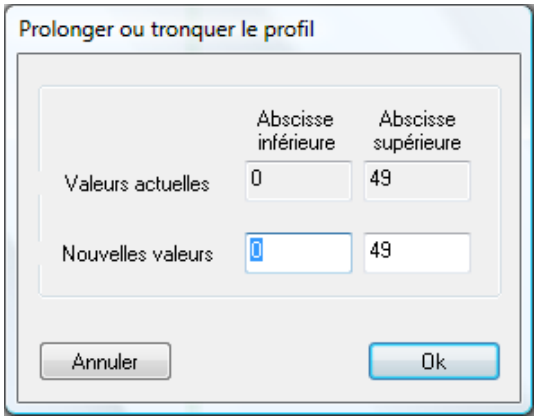


Figure 108 : Prolongement / troncature du profil

Cas du prolongement et de la troncature du profil :

En cliquant sur le bouton « Prolonger ou tronquer le profil », la fenêtre suivante apparaît, permettant à l'utilisateur de saisir les nouveaux intervalles en abscisses du profil. Les valeurs actuelles sont renseignées dans les zones de textes grisées.

Si les valeurs entrées génèrent un intervalle plus grand que celui qui est actuellement affiché, le profil sera prolongé à gauche et/ou à droite.

Si les valeurs entrées génèrent un intervalle plus petit que celui qui est actuellement affichée, le profil sera tronqué à gauche et/ou à droite.

4.4.1.1 *Recommencer le profil*

Cette fonction est disponible depuis l'option « Recommencer le profil » du menu « Outils ». Elle permettra à l'utilisateur de purger la zone de dessin de tout objet présent. Cela équivaut à la fonction d'ouverture d'un « nouveau document » dans le menu « Fichier ».

4.5 Ajouts d'étiquettes ou de sondages

4.5.1 *Etiquettes*

Le logiciel vous donne la possibilité de renseigner le profil par l'ajout d'informations libres sous forme d'étiquettes : il s'agit de zones de texte non désactivables à placer librement sur le profil.

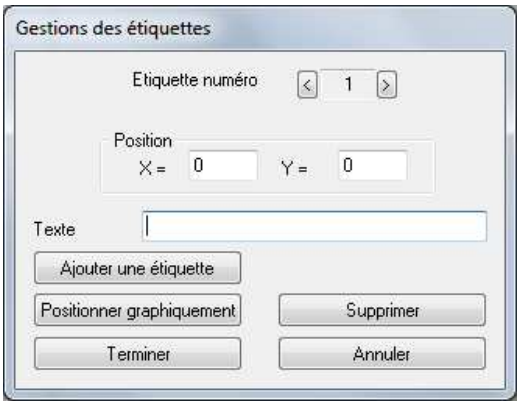


Figure 109 : Ajout d'une étiquette

Mode opératoire :

a- Cliquer sur « Affichage », puis sur « Ajouter une étiquette»

b- Saisir la position et le texte de l'étiquette
Possibilité de positionner graphiquement l'étiquette en cliquant sur « positionner graphiquement »
Positionner l'étiquette sur le profil et faire un clic droit sur la souris

4.5.2 *Sondages*

Vous pouvez également saisir les coupes géologiques de sondages dont vous disposez de manière à compléter le profil ou préalablement à la définition de celui-ci.

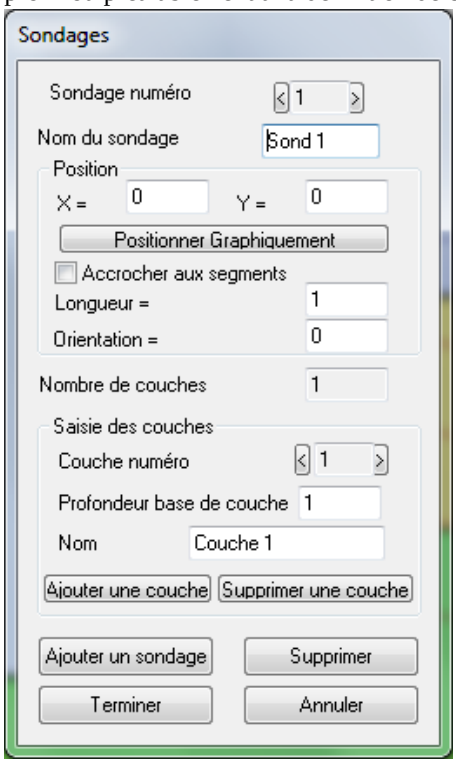


Figure 110 : Saisie des sondages

Mode opératoire :

a- Cliquer sur « Affichage », puis sur « Saisies des sondages », puis sur « Ajouter ».

b- Saisir le nom du sondage.

c- Positionner le sondage soit en saisissant les coordonnées, soit en le positionnement graphiquement. Il est possible d'accrocher celui-ci à un segment en cochant « Accrocher aux segments ».

d- Saisir la longueur totale et l'inclinaison du sondage.

c- Saisir la profondeur de la base de la première couche et son nom Ajouter éventuellement une nouvelle couche en cliquant sur le bouton « ajouter une couche ». Recommencer la saisie de la profondeur et du nom. Recommencer pour chaque couche voulue Pour supprimer ou modifier une couche, il faut utiliser le bouton de navigation pour récupérer les données de la couche souhaitée.

f- Vous pouvez ensuite ajouter un nouveau sondage ou supprimer le sondage saisi. Lorsque que les données entrées sont complètes, cliquer sur « Terminer », ou « Annuler » si vous souhaitez revenir en arrière ou recommencer.

4.6 Zone des 3H

Cette fonction est disponible depuis l'option « Définir la zone des 3H » du menu « Outils ».
La fenêtre suivante apparaît accompagnée d'un curseur surmonté de la mention « 3H » dans la zone graphique.

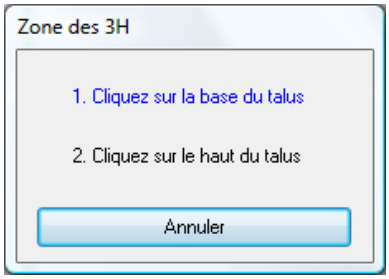


Figure 111 : Définition de la zone des 3H

Mode opératoire :
a- Cliquer en premier lieu sur le point correspondant au bas du talus. Cette mention apparaît en bleu dans la boîte de dialogue. Un rectangle de sélection en pointillés se matérialise lors du déplacement du curseur

b- Cliquer ensuite sur le point correspondant au haut du talus. Cette mention apparaît en bleu dans la boîte de dialogue et 2 axes verticaux colorés en orange, portant les mentions « 3H » se matérialiseront.
Ces axes sont respectivement placés à une distance 3H de chacun des 2 points qui ont été définis pour définir la hauteur de talus. La figure ci-dessous illustre l'affichage des axes de la zone des « 3H » en aval et en amont.

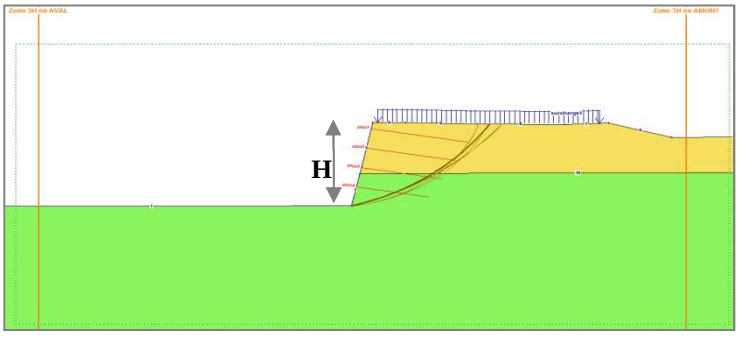


Figure 112 : Délimitation de la zone des 3H

5. Gestion du phasage

5.1 La modification d'objets

Le logiciel vous permet de configurer les calculs par phases ou cas. L'ajout de cas permet d'effectuer plusieurs calculs en une même phase en faisant varier les paramètres de calcul. Cela vous permet par exemple d'étudier l'équilibre d'un profil sous différentes surfaces de rupture (ou modèles de surfaces de ruptures) sans avoir à créer de nouvelle phase.
Pour ajouter des calculs comprenant la modification du profil, des sols, des inclusions ou des sollicitations, l'ajout d'une nouvelle phase est indispensable. De la même manière, la désactivation d'objets n'est pas possible au cas par cas ; si un segment pour le Cas 1 au sein d'une phase est désactivé, il sera automatiquement désactivé au Cas 2 de cette même phase.

Le tableau ci-dessous liste les objets qu'il est possible de modifier par phase ou par cas :

Objets	Phase	Cas
Point	OUI	NON
Segment	OUI	NON
Nappe	OUI	NON
Inclusion	OUI	NON
Sol	OUI	NON
Forces et contraintes	OUI	NON
Séisme	OUI	OUI
Surface de rupture	OUI	OUI
fenêtre graphique	OUI	OUI

Tableau 8 : Objets modifiables

5.2 Ajout et suppression de Phase / Cas

A tout moment de la configuration du calcul, il est possible d'ajouter ou supprimer une phase ou un cas.
L'ajout ou la suppression se fait depuis le menu de la fenêtre gestion des phases, par clic droit dans cette zone.

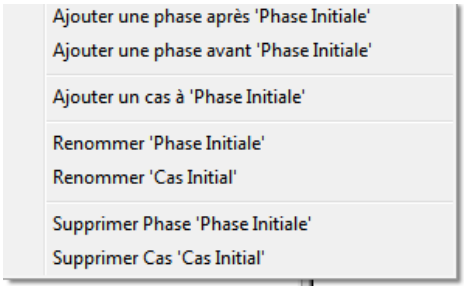

Ajouter une phase après 'Phase Initiale'
Ajouter une phase avant 'Phase Initiale'
Ajouter un cas à 'Phase Initiale'
Renommer 'Phase Initiale'
Renommer 'Cas Initial'
Supprimer Phase 'Phase Initiale'
Supprimer Cas 'Cas Initial'

Figure 113 : Menu Ajout / Suppression de phase ou cas

Le menu déroulant qui s'affiche permet de :

- Ajouter une phase
- Ajouter un cas
- Renommer une phase ou un cas
- Supprimer une phase ou un cas

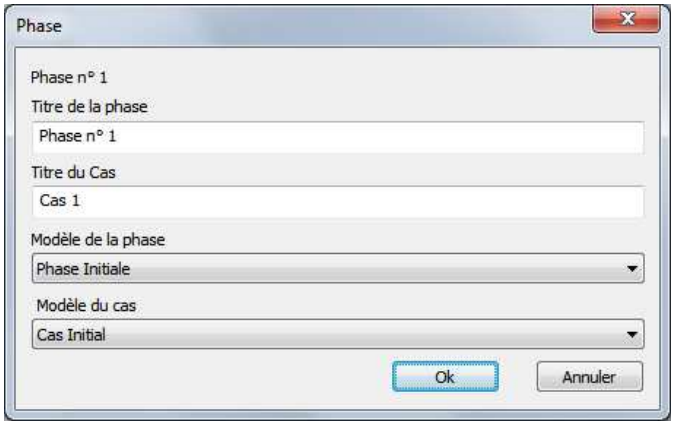


Figure 114 : Ajout d'une phase ou d'un cas

Après ajout d'une phase ou un cas :

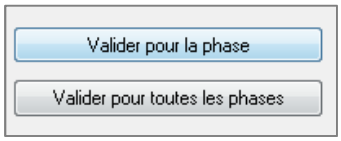
a- Saisir le nom de la nouvelle phase et/ou du nouveau cas.

b- Choisir la phase et le (ou les) cas modèles.
Il est possible dans le cas d'ajout de phases, de « copier » dans la nouvelle phase tous les cas de la phase modèle

5.3 Modification des phases

Lors de la modification des objets, les valeurs saisies peuvent être validées

- Soit pour toutes les phases, bouton « Valider pour toutes les phases »
- Soit pour la phase courante, bouton « Valider pour la phase »



De la même manière, l'association de sols aux segments peut être faite :

- Soit pour toutes les phases, bouton « Pour toutes les phases »
- Soit pour la phase courante, bouton « Seulement pour la phase 'XXX'»

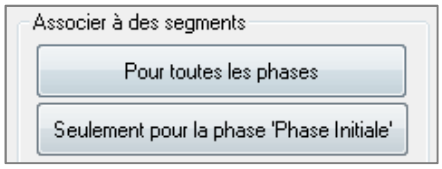


Figure 115 : Modification des phases

Pour faire « disparaître » un segment ou tout autre objet de la phase, cliquer sur le bouton « activer/désactiver des objets pour la phase » . Cliquer sur les objets à activer ou désactiver pour la phase courante.

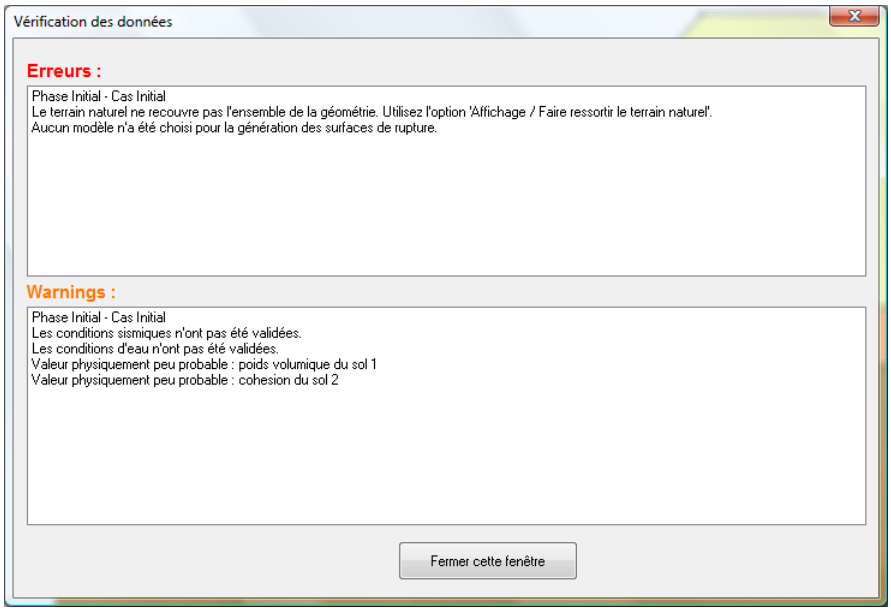
Attention la suppression d'objets par le bouton est faite pour toutes les phases.

La validation de la modification d'un objet pour une phase donnée (« Valider pour la phase ») dissocie cet objet des propriétés que cet objet possède dans les autres phases.
Ainsi, si un objet a été modifié et « validé pour la phase » numéro 3, la modification de cet objet « Pour toutes les phases »dans la phase numéro 1 n'impacte pas la phase numéro 3.

6. Le calcul GEOSTAB

6.1 Vérification des données

Sélectionner l'option Vérification des données du menu « Calcul ». La fenêtre suivante apparaîtra pour permettre à l'utilisateur de vérifier pour chaque phase et chaque cas s'il a rentré les éléments suffisants pour que le calcul aboutisse. Dans le cas contraire, les oublis qui conduiront à des erreurs critiques sont signalés dans la zone « Erreurs » et les avertissements sont signalés dans « Warnings ».


Vérification des données
Erreurs :
Phase Initial - Cas Initial
Le terrain naturel ne recouvre pas l'ensemble de la géométrie. Utilisez l'option 'Affichage / Faire ressortir le terrain naturel'.
Aucun modèle n'a été choisi pour la génération des surfaces de rupture.
Warnings :
Phase Initial - Cas Initial
Les conditions sismiques n'ont pas été validées.
Les conditions d'eau n'ont pas été validées.
Valeur physiquement peu probable : poids volumique du sol 1
Valeur physiquement peu probable : cohesion du sol 2
Fermer cette fenêtre

Les points notés dans la section « Erreurs » rendent le calcul impossible.

Les points notés dans la section « Warnings » sont des remarques sur les données saisies mais n'empêchent pas le calcul.

Seule l'interprétation d'un géotechnicien conclura sur l'utilité ou non de modifier les paramètres du calcul vis-à-vis de ces avertissements

Figure 116 : Vérification des données

6.2 Lancement du calcul

Le calcul peut être lancé avec l'option « Lancer le calcul » du menu « Calcul » ou depuis la barre d'outils en cliquant sur l'icône . Si le projet contient plusieurs cas et/ou plusieurs phases, la fenêtre illustrée ci-dessous apparaît.

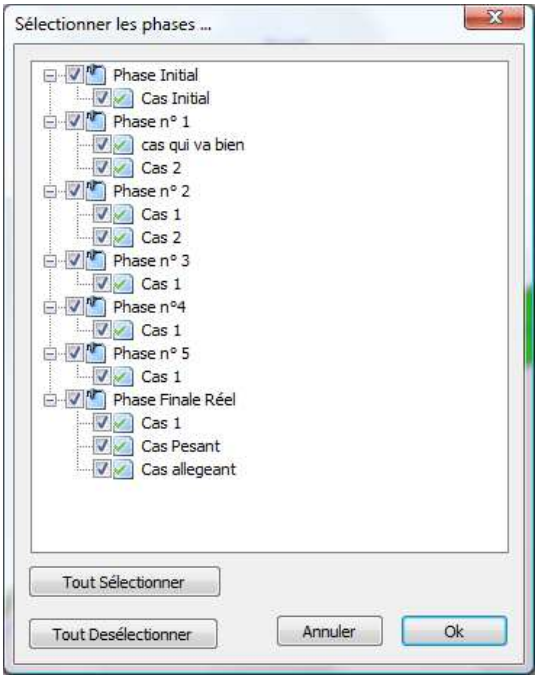


Figure 117 : Sélection des Phases/Cas à calculer

Elle permettra de savoir quels cas ou phases, l'utilisateur veut effectuer le calcul. Il suffit de cocher ou décocher les cases correspondantes.

Ensuite, la fenêtre de vérification illustrée en figure précédente apparaît.

Si, à ce stade, les données contiennent des erreurs, GEOSTAB désactive le bouton « Lancer le calcul », pour obliger l'utilisateur à rectifier les valeurs mises en cause dans le bloc « Erreurs ». Si seuls des avertissements sont présents sur cette fenêtre, alors le calcul peut quand même être lancé.

Lorsque le bouton « Lancer le calcul » est disponible, cliquer sur ce bouton. L'utilisateur est obligé d'enregistrer le fichier. Après quelques secondes d'attente, l'utilisateur obtient la sortie graphique correspondante. Cette fenêtre de résultats rassemble les données et résultats du calcul sur une ou plusieurs feuilles au format A4.

6.3 Fin de calcul : Affichage de la feuille de résultats

Les résultats se présentent sous forme d'une feuille de résultats, récapitulant à la fois les données d'entrée, les options de calcul et les résultats.

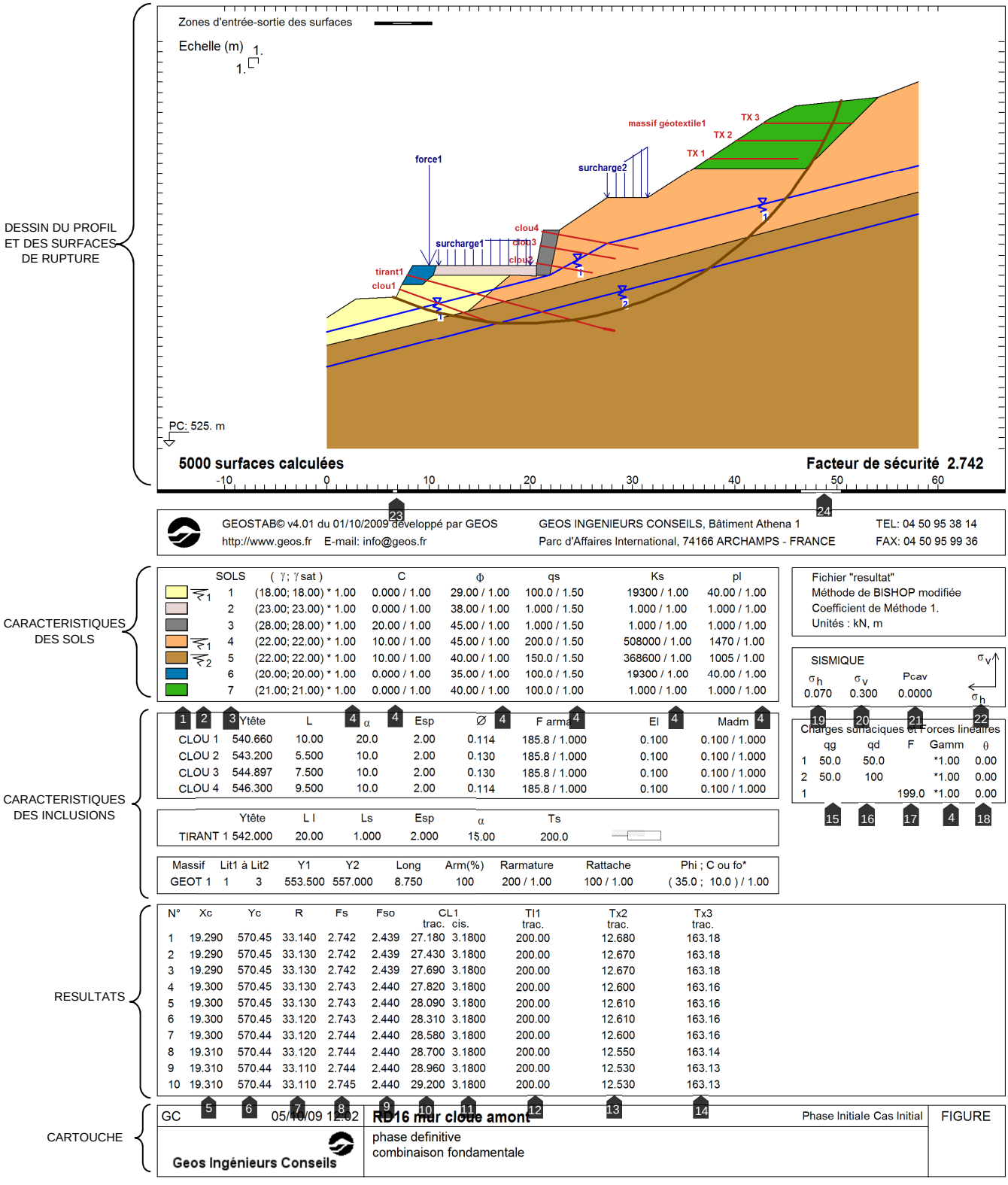


Figure 118 : Exemple de fichier résultat

Légende :

CARACTERISTIQUES DES SOLS
1 Trame du sol
2 Numéro de la nappe associée au sol
3 Numéro du sol
4 Facteur de sécurité partiel

RESULTAT
5 Abscisse du centre du cercle
6 Ordonnée du centre du cercle
7 Rayon du cercle
8 Facteur de sécurité avec inclusions
9 Facteur de sécurité avec inclusions
10 Effort en traction dans le clou
11 Effort en cisaillement dans le clou 1
12 Effort en traction dans le tirant 1
13 Effort en traction dans le géotextile 2
14 Effort en traction dans le géotextile 3

CHARGES ET FORCES
15 Contrainte à gauche pour une surcharge
16 Contrainte à droite pour une surcharge
17 Intensité de la force ou de la charge
18 Inclinaison de la force ou de la surcharge

DONNEES SISMIQUE
19 Accélération sismique horizontale/gravité
20 Accélération sismique verticale/gravité
21 Pression de cavitation
22 Orientation des composantes

SURFACE de RUPTURE
23 Zone d'entrée des surfaces de rupture
24 Zone de sortie des surfaces de rupture

A chaque cas ou phase correspond la feuille de résultat associée.

Il vous suffit de cliquer sur les phases et cas dans le menu de gestion des phases (figure ci-contre) pour naviguer entre les résultats des différents calculs.

Les coefficients de sécurités obtenus sont inscrits pour les cas calculés.

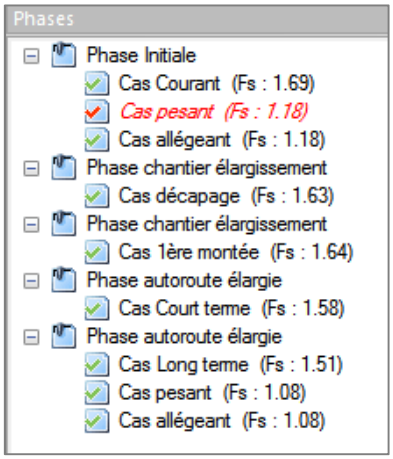
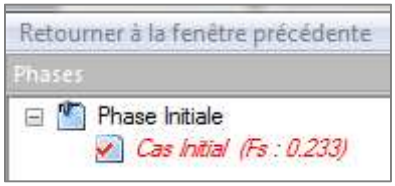

Phases
Phase Initiale
Cas Courant (Fs : 1.69)
Cas pesant (Fs : 1.18)
Cas allégeant (Fs : 1.18)
Phase chantier élargissement
Cas décapage (Fs : 1.63)
Phase chantier élargissement
Cas 1ère montée (Fs : 1.64)
Phase autoroute élargie
Cas Court terme (Fs : 1.58)
Phase autoroute élargie
Cas Long terme (Fs : 1.51)
Cas pesant (Fs : 1.08)
Cas allégeant (Fs : 1.08)

Figure 119 : Affichage des résultats par cas

6.3.1 *Retour à la fenêtre précédente (passage au pré-processeur)*

Si l'utilisateur souhaite faire des modifications sur le calcul, il doit cliquer sur le bouton « Retourner à la fenêtre précédente ».



Remarque :
En revenant sur la fenêtre de saisie, après un calcul, les surfaces de rupture calculées seront dessinées sur le profil et elles disparaîtront en cas de modification ou d'ajout d'objet sur le profil.

6.3.2 *Commandes (exploitation de la sortie GEOSTAB)*

L'utilisateur a la possibilité d'utiliser 3 commandes via le menu de sortie lorsque la sortie de GEOSTAB est affichée à l'écran :

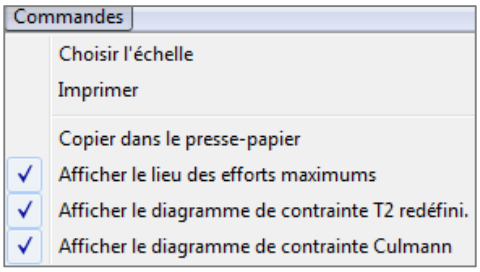


Figure 120 : Menu "Commande"

- Le choix de l'échelle courante d'affichage de la sortie ;
- L'impression de la sortie ;
- La copie du dessin dans le presse-papiers au format « .bmp ».

Le menu « commandes » vous permet également de compléter le profil de sortie en activant ou non l'affichage des résultats de calculs avancés pour les clous:

- La position des efforts maximums,
- Le diagramme des contraintes T2 redéfinis
- Le diagramme de poussée de Culmann

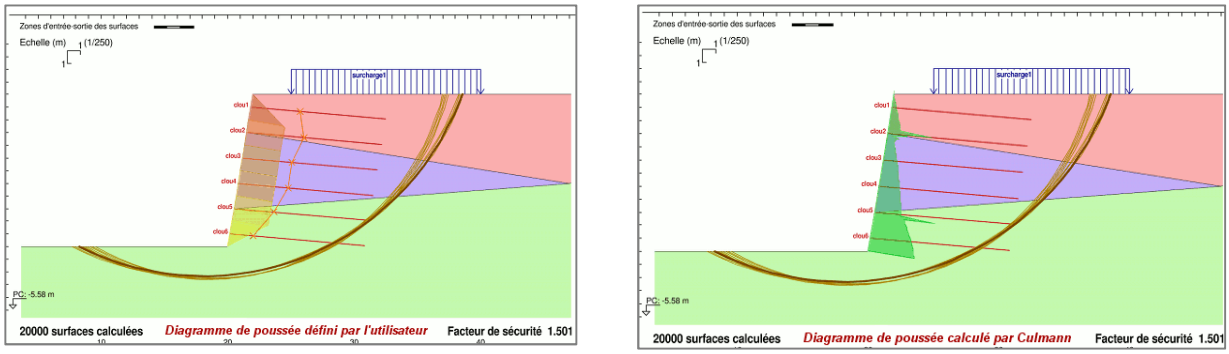

20000 surfaces calculées
Diagramme de poussée défini par l'utilisateur
Facteur de sécurité 1.501
20000 surfaces calculées
Diagramme de poussée calculé par Culmann
Facteur de sécurité 1.501

Figure 121 : Visualisation des diagrammes de poussée

6.3.2.1 *Choix de l'échelle*

L'utilisateur peut choisir l'échelle d'affichage de la sortie de GEOSTAB surtout en cas de rétrécissement et d'agrandissement) en sélectionnant l'option « Choix de l'échelle » du menu « Commandes ».

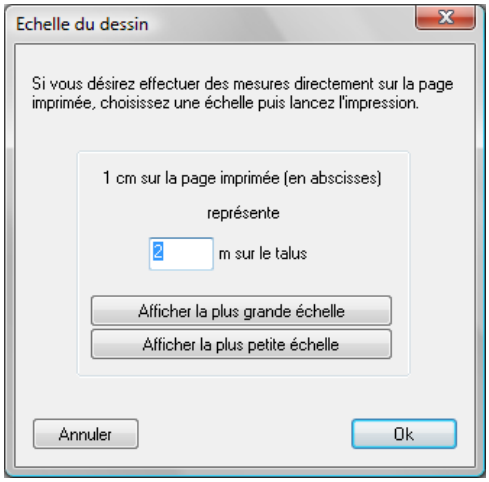

Echelle du dessin
Si vous désirez effectuer des mesures directement sur la page imprimée, choisissez une échelle puis lancez l'impression.
1 cm sur la page imprimée (en abscisses)
représente
2
m sur le talus
Afficher la plus grande échelle
Afficher la plus petite échelle
Annuler
Ok

Figure 122 : Choix de l'échelle

La boîte de dialogue qui apparaît laisse l'utilisateur saisir la valeur de l'échelle sachant que la valeur de l'échelle courante est renseignée dans la zone de saisie.

L'utilisateur peut savoir si sa nouvelle valeur se trouve encadrée entre les valeurs de la plus petite et de la plus grande échelle en cliquant sur les boutons « Afficher la plus petite échelle » ou le bouton « Afficher la plus grande échelle ».

6.3.2.2 *Imprimer*

Pour imprimer le résultat de votre calcul**,** en sélectionnant l'option Imprimer du menu Commandes. Comme lors du calcul, une fenêtre apparait, pour choisir quelles phases et quels cas, l'utilisateur veut imprimer (figure 114). Ensuite, une boîte de dialogue apparaît et invite à choisir l'imprimante et les propriétés de l'impression (figure 115).

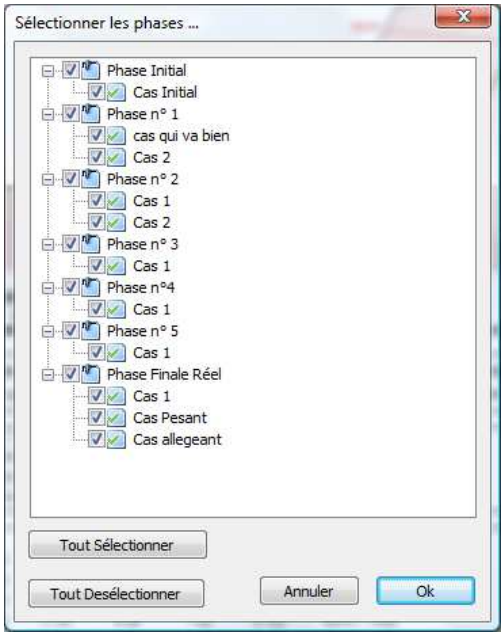


Figure 123 : Sélection des phases à imprimer

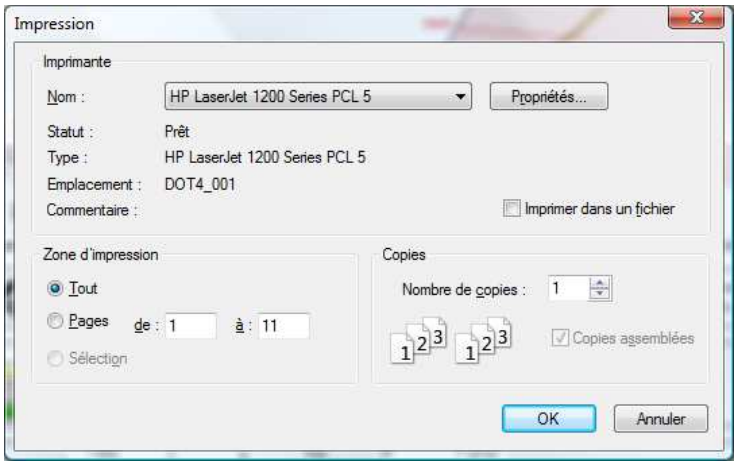


Figure 124 : Paramètres d'impression

6.3.2.3 Copier dans le presse-papiers

Il est possible de créer une image au format bitmap (*.bmp) de la feuille de résultat. Cette option est utile pour incorporer le résultat de calcul dans un rapport par exemple. Pour cela, il faut sélectionner l'option « Imprimer » du menu « Commandes ». Entrer alors un nom de fichier et cliquer sur OK. Lorsque le processus s'est effectué, la boîte de dialogue suivante s'affiche.

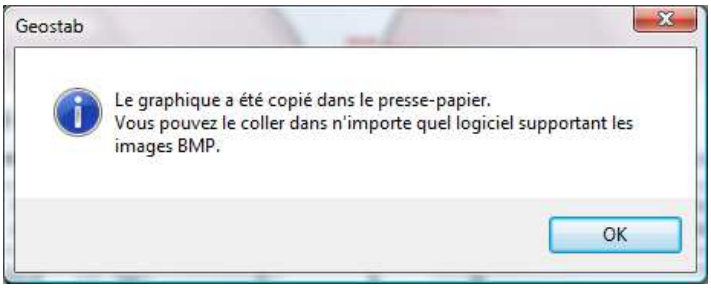

Geostab
Le graphique a été copié dans le presse-papier.
Vous pouvez le coller dans n'importe quel logiciel supportant les images BMP.
OK

Figure 125 : Copie du fichier résultat

6.4 Visualiser le fichier résultats

L'utilisateur peut récupérer les résultats du calcul en sélectionnant l'option « Visualiser le fichier résultats » du menu « Calcul ». La boîte de dialogue qui apparaît (figure suivante) retourne les données et les calculs effectués par le logiciel. En fermant cette boîte de dialogue, les surfaces de rupture calculées s'affichent sur la fenêtre graphique.

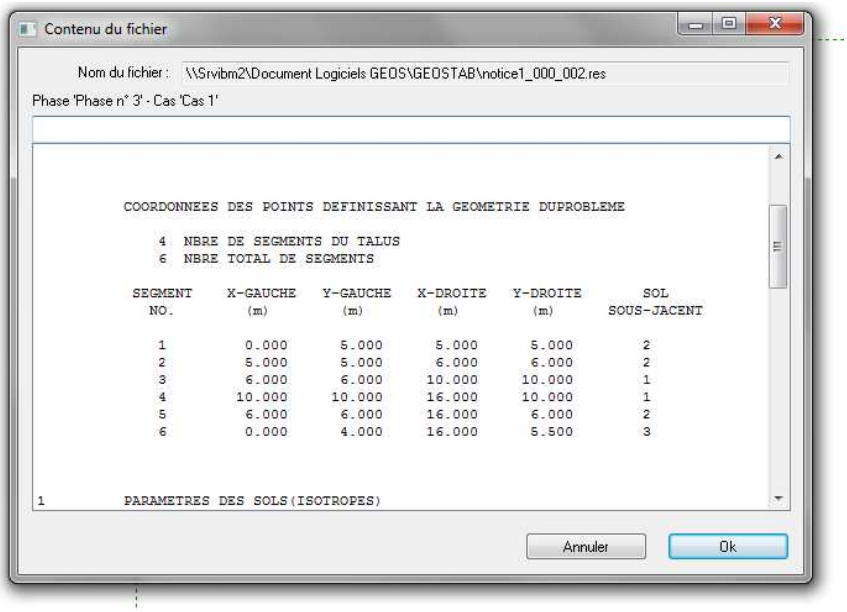

Contenu du fichier
Nom du fichier : \\Srvibm2\Document Logiciels GEOS\GEOSTAB\notice1_000_002.res
Phase 'Phase n° 3' - Cas 'Cas 1'
COORDONNEES DES POINTS DEFINISSANT LA GEOMETRIE DUPROBLEME
4 NBRE DE SEGMENTS DU TALUS
6 NBRE TOTAL DE SEGMENTS
SEGMENT NO. X-GAUCHE (m) Y-GAUCHE (m) X-DROITE (m) Y-DROITE (m) SOL SOUS-JACENT
1 0.000 5.000 5.000 5.000 2
2 5.000 5.000 6.000 6.000 2
3 6.000 6.000 10.000 10.000 1
4 10.000 10.000 16.000 10.000 1
5 6.000 6.000 16.000 6.000 2
6 0.000 4.000 16.000 5.500 3
1 PARAMETRES DES SOLS(ISOTROPES)
Annuler
Ok

Figure 126 : Fichier résultat

Remarque :
Lors de l'exécution du calcul, un fichier portant le nom du fichier de données mais avec une extension ".res" est créé. Ce fichier comporte un écho numérique de toutes les données et présente tous les résultats sous forme numérique.
Cette fenêtre s'ouvre également lorsque le calcul n'a pu aboutir. Le programme vous propose alors de consulter le fichier résultat pour comprendre l'origine du problème.

CONSIDERATIONS THEORIQUES

1. Généralités

En général, l'analyse par équilibre est statiquement indéterminée. L'exemple donné sur la Figure 1 illustre ce fait.

La résultante des forces motrices, R_d, appliquée à la masse de sol située au-dessus de la surface de rupture ainsi que la ligne d'action de R_d peuvent être déterminées directement. Les forces motrices composant R_d comprennent :

- les forces gravitaires,
- les forces associées aux tremblements de terre,
- les poussées d'Archimède si la masse de sol est partiellement ou totalement immergée,
- les surcharges superficielles appliquées au niveau du terrain naturel à l'intérieur de la zone de rupture.

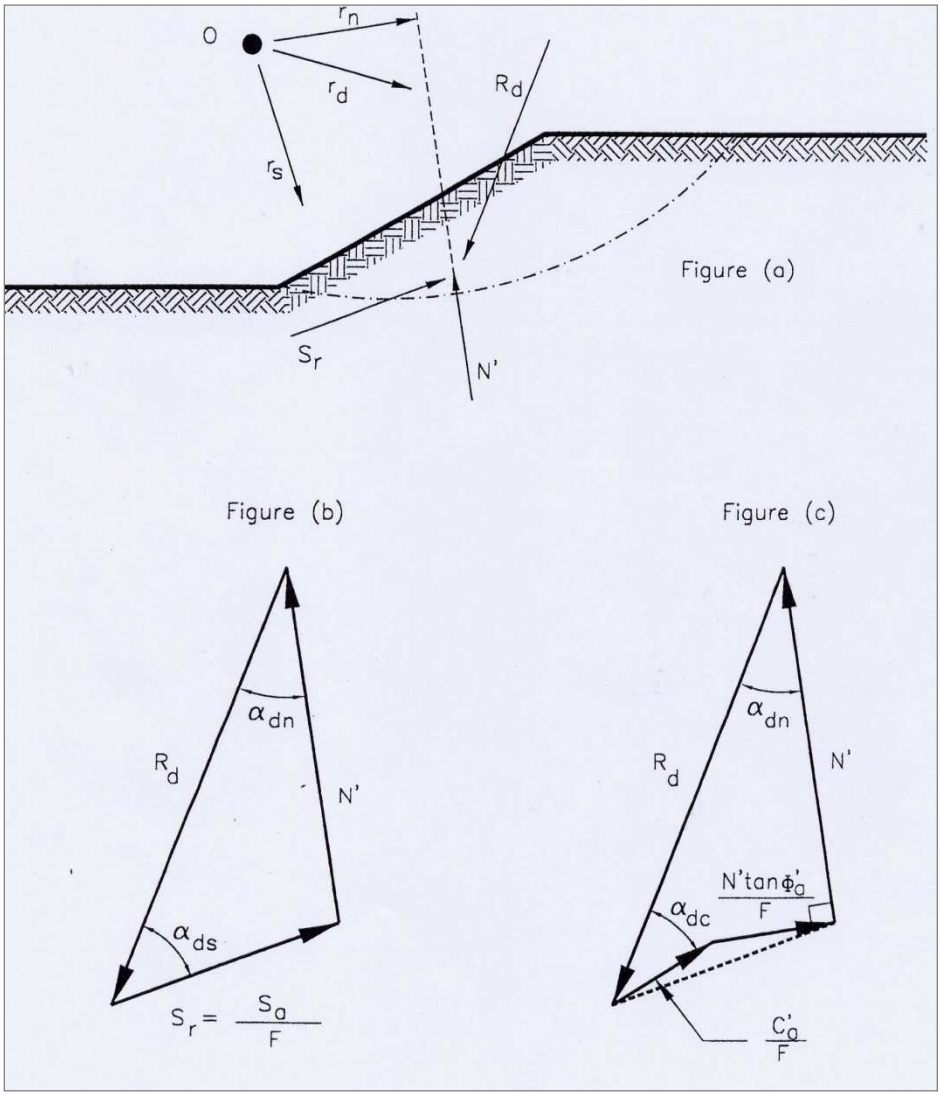


Figure 1: Forces considérées pour l'équilibre limite

La distribution des contraintes normales effectives est inconnue; la résultante de ces contraintes peut être représentée par une force N' dont l'intensité et la ligne d'action sont inconnues.

La résistance au cisaillement mobilisée le long de la surface de rupture peut être remplacée par une force de cisaillement résultante, S_r, dont la ligne d'action est aussi inconnue.

La résistance au cisaillement mobilisée est celle requise pour assurer l'équilibre limite de la masse située au-dessus de la surface de rupture.

Si la pente est stable, la résistance au cisaillement mobilisée pour assurer l'équilibre n'est qu'une fraction de celle disponible.

Le coefficient de sécurité peut être défini comme étant le rapport entre la résistance au cisaillement disponible et celle mobilisée pour assurer l'équilibre limite :

$$F = \frac{S_a}{S_r} \qquad (1)$$

Avec :

- Sa : résultante des forces de cisaillement mobilisables le long de la surface de rupture
- Sr : résultante des forces de cisaillement mobilisées le long de la surface de rupture pour assurer l'équilibre limite.

La force de cisaillement résultante mobilisée pour assurer l'équilibre est donc :

$$S_r = \frac{S_a}{F} \qquad (2)$$

La valeur du coefficient de sécurité tel qu'exprimé est une valeur moyenne. Le modèle de l'équilibre limite ne tient pas compte des concentrations de contraintes mais fait l'hypothèse de la proportionnalité entre la résistance au cisaillement mobilisée le long de la surface de rupture et la résistance au cisaillement disponible.

Ayant défini la notion de coefficient de sécurité, une valeur unique de ce dernier doit être déterminée. Pour cela, des relations entre les forces appliquées sont établies ou postulées, la première de ces relations étant celle qui satisfait l'équilibre statique.

Selon la Figure 1, l'équilibre des moments autour d'un point arbitraire "0" donne :

$$R_d\, r_d - N'\, r_n - S_r\, r_s = 0 \qquad (3)$$

Avec r_d, r_n et r_s les bras de levier des résultantes R_d, N' et S_r par rapport au point 0. Les lignes d'actions des forces N' et S_r étant inconnues, les bras de levier r_n et r_s sont aussi inconnus.

L'équilibre implique aussi que la somme des forces projetées selon toute direction soit nulle. Ceci est vrai en particulier lorsque les forces sont projetées perpendiculairement et parallèlement à la résultante des forces motrices R_d. Ces projections donnent :

$$R_d - S_r \cos\alpha_{ds} - N' \cos\alpha_{dn} = 0 \qquad (4a)$$

$$S_r \sin\alpha_{ds} - N' \sin\alpha_{dn} = 0 \qquad (4b)$$

Avec α_{ds} et α_{dn} les angles entre R_d et S_r et N' respectivement. Les lignes d'action des forces N' et Sr étant inconnues, les angles α_{ds} et α_{dn} sont aussi inconnus.

Le bilan des inconnues et des équations indépendantes les reliant dans l'expression de l'équilibre s'établit à sept inconnues F, S_a, N', r_n, r_s, α_{dn}, α_{ds} et seulement trois équations à partir desquelles une valeur unique du coefficient de sécurité est recherchée.

Le problème est statiquement indéterminé. Pour lever l'indétermination, des hypothèses doivent être introduites quant aux forces ou aux relations contraintes - déformations.

Dans le cas de méthodes par équilibre limite, le critère de Mohr-Coulomb est applicable et une relation linéaire entre la résistance au cisaillement et la contrainte effective normale est généralement utilisée :

$$\tau_f = c'_f + \sigma'_n \tan\phi'_f \qquad (5)$$

Avec :

- τ_f : la résistance au cisaillement mobilisable à la rupture sur la surface de rupture
- c'_f, ϕ'_f : les paramètres effectifs de résistance décrivant l'enveloppe de Mohr-Coulomb (résistance de pic)
- σ'_n : la contrainte effective à la rupture, normale à la surface de rupture.

A la place de la résistance de pic, il est possible d'introduire la résistance résiduelle. Ainsi l'expression (5) peut être écrite de la façon générale suivante :

$$\tau_a = c'_a + \sigma'_n \tan\phi'_a \qquad (5a)$$

Avec :

- τ_a, la résistance au cisaillement disponible
- c'_a et ϕ'_a, les paramètres effectifs de résistance décrivant l'enveloppe de Mohr-Coulomb applicable.

Exprimée en termes de forces, l'expression (5a) devient :

$$S_a = C'_a + N' \tan\phi'_a \qquad (6)$$

Avec C'_a, la composante résultante de la résistante au cisaillement disponible qui est indépendante de la distribution des contraintes normales à la surface de rupture.

La force de cisaillement résistante qu'il faut mobiliser sur la surface de rupture pour assurer l'équilibre limite est alors :

$$S_r = \frac{C'_a + N' \tan\phi'_a}{F} \qquad (7)$$

En examinant les deux composantes de la force de cisaillement résistante C'_a/F et $(N' \tan \phi'_a) /F$ sur la Fig. 1c, deux observations peuvent être faites:

- l'intensité de la composante C'_a / F dépend seulement du coefficient de sécurité F et sa ligne d'action de la géométrie de la surface de rupture considérée; par conséquent, l'angle αdc de la Figure 1c est connu,
- la composante de résistance au cisaillement qui dépend de la distribution de la contrainte normale doit être perpendiculaire à la force normale résultante N'.

Ces deux observations ne permettent pas à elles seules de déterminer la valeur du coefficient de sécurité F et le problème demeure statiquement indéterminé. Pour arriver à déterminer F, il faut faire une hypothèse quant à la distribution des contraintes effectives normales à la surface de rupture de sorte que l'intensité et la ligne d'action de la force résultante N' puissent être établies.

Dans ce cas, N', α_{dn} et r_n sont connus et les inconnues sont réduites à quatre. Avec les trois équations d'équilibre et la relation entre la résistance au cisaillement et la contrainte normale effective, une valeur de F peut être déterminée. Cette valeur de F dépend des hypothèses faites quant à la distribution des contraintes effectives normales à la surface de rupture.

2. Généralités sur la méthode des tranches

Les méthodes les plus couramment utilisées pour l'analyse de la stabilité générale de pente consistent à diviser la masse située au-dessus de la surface de rupture hypothétique en tranches tel qu'indiqué sur la Figure 2. Cette approche permet de tenir compte des hétérogénéités du profil du sol, la masse étant divisée de manière à ce que chaque tranche soit caractérisée à sa base par un seul jeu de paramètres de résistance.

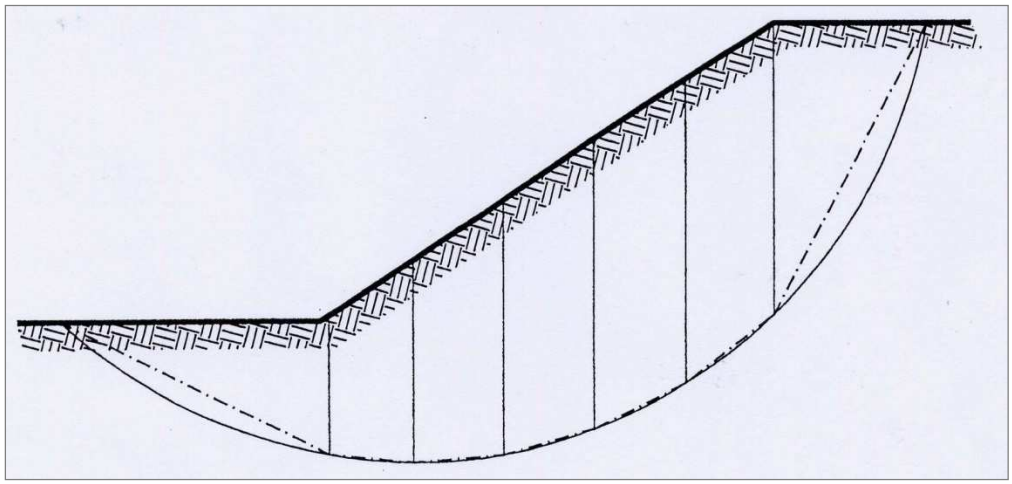


Figure 2: Discrétisation de la surface de rupture en tranches et linéarisation de la base des tranches

Il est pratique d'assimiler la base de chaque tranche à la corde qui sous-tend la surface de cisaillement courbe plutôt qu'à la surface de cisaillement courbe elle-même, l'erreur commise sur l'inclinaison de la base de chaque tranche et sur les poids des tranches étant minime si un nombre adéquat de tranches est utilisé.

Les forces agissant sur chaque tranche sont indiquées sur la Figure 3, le bilan des inconnues et des équations disponibles pour l'analyse de stabilité étant établi dans le Tableau 1 ci-après. Intentionnellement, les autres forces habituellement rencontrées dans les analyses de stabilité (écoulement, surcharges, tremblements de terre) n'ont pas été considérées. Leur prise en compte n'ajoute rien au degré d'indétermination statique mais ne fait que compliquer les expressions mathématiques dérivées.

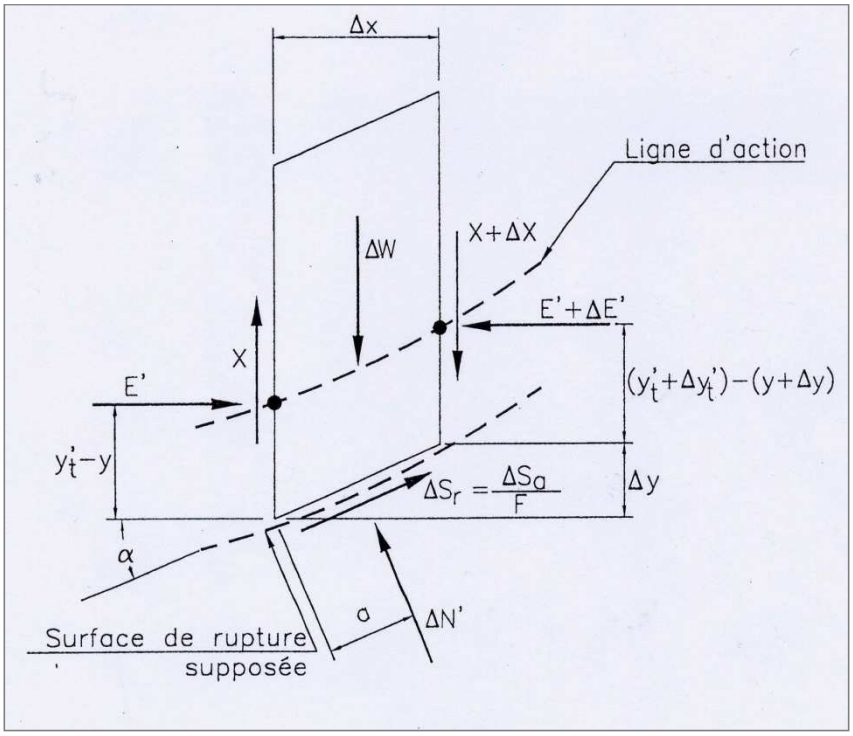


Figure 3: Forces agissant sur une tranche

Selon le Tableau 1ci-après, il apparaît que le problème est statiquement indéterminé dès que le nombre des tranches est supérieur à 1. Dans ce cas, des hypothèses simplificatrices doivent être faites pour résoudre le problème.

Quand on considère l'équilibre des moments d'une masse de sol située au-dessus d'une surface de rupture circulaire, il n'est pas nécessaire de connaître la position des efforts effectifs normaux à la base de chaque tranche, ΔN', si l'équilibre des moments est effectué par rapport au centre de la surface circulaire.

Tous les efforts ΔN'ont une ligne d'action passant par le centre du cercle et ils ne produisent aucun moment par rapport à ce point.

Dans ce cas, l'équation d'équilibre des moments par rapport au centre du cercle devient :

$$\sum_{1}^{n} \Delta W \; r \sin\alpha - \sum_{1}^{n} \Delta S_r \, r = 0 \qquad (8)$$

Avec :

- ΔW le poids des tranches individuelles
- r le rayon du cercle
- α l'inclinaison de la base de chaque tranche
- ΔSr la force résistante de cisaillement agissant à la base de chaque tranche
- n le nombre de tranches

La force résistante, ΔS_r, agissant le long de la base de chaque tranche est définie comme étant la somme des composantes de résistance de cohésion et de frottement disponibles divisée par le coefficient de sécurité, F:

$$\Delta S_r = \frac{\Delta C'_a + \Delta N' \tan\phi'_a}{F} \qquad (9)$$

Avec :

- ΔN' la résultante de la contrainte effective normale appliquée à la base de la tranche
- $\Delta C'_a$ la résultante de la résistance au cisaillement disponible à la base de la tranche qui est indépendante de l'état des contraintes effectives.

En substituant ΔS_r par son expression de l'équation (9) dans l'équation (8), on obtient pour F :

$$F = \frac{\sum_{1}^{n} \left(\Delta C'_a + \Delta N' \tan\phi'_a \right)}{\sum_{1}^{n} \Delta W \sin\alpha} \qquad (10)$$

Selon le Tableau 1 en page suivante, le nombre d'inconnues est réduit à 4n-2 étant donné qu'il n'est pas nécessaire de connaître dans ce cas la position de la force effective normale agissant à la base de chaque tranche. Malgré cela, les 3 équations d'équilibre sont insuffisantes pour rendre le système statiquement déterminé et il est nécessaire de faire des hypothèses complémentaires. Ces hypothèses sont généralement faites sur les forces agissant sur les faces latérales des tranches.

Equations	
n*	Equations d'équilibre des moments pour chaque tranche
2n	Equations d'équilibre des forces dans chacune des deux directions indépendantes pour chaque tranche
n	Loi de Mohr-Coulomb entre la résistance au cisaillement et la contrainte normale effective pour le sol à la base de chaque tranche
4n	Nombre total d'équations

Inconnues	
1	Coefficient de sécurité (F)
n	Forces effectives agissant sur la base de chaque tranche (ΔN)
n	Positions de la force normale effective agissant sur la base de chaque tranche (a)
n	Résistances au cisaillement disponibles à la base de chaque tranche (ΔS_a)
n-1	Forces normales entre tranches (E')
n-1	Forces de cisaillement entre tranches (X)
n-1	Positions des forces entre tranches (y'_t)
6n-2	Nombre total d'inconnues

* n est le nombre de tranches.
Les différents paramètres sont décrits sur la Figure 3

Tableau 1 : Equations et inconnues associées à la méthode des tranches

3. Méthode de Fellenius

L'hypothèse qui simplifie le plus les calculs a été proposée par Fellenius (1927). Cette hypothèse considère que le bilan des forces latérales dans l'équilibre de la tranche est nul : la force effective normale et la force effective de cisaillement agissant sur la face de gauche de la tranche sont égales mais de signe opposé à celles agissant sur la face de droite.

Si aucune force extérieure n'agit sur les faces extérieures des deux tranches d'extrémité, le cas courant dans les problèmes de stabilité de pente, l'hypothèse requiert que les forces entre tranches agissant sur ces deux tranches d'extrémité soient également nulles. De même, selon le principe de Newton qui stipule l'égalité entre l'action et la réaction, les forces entres tranches seraient aussi nulles pour les tranches intermédiaires, ce qui n'est physiquement pas raisonnable.

En reprenant le Tableau 1, avec l'hypothèse de Fellenius le nombre total d'inconnues est réduit de 3n-3 après éliminations des forces latérales, ce qui donne un nombre total d'inconnues de n+1.

Le problème est donc statiquement sur déterminé, le nombre d'équations étant nettement supérieur au nombre d'inconnues.

La force normale effective à la base de chaque tranche est

$$\Delta N' = \Delta W \cos\alpha$$

Avec ΔW intégrant l'effet de l'eau, y compris déjaugeage et surcharge si la nappe est au-dessus du terrain naturel.

Et l'expression du coefficient de sécurité F de l'équation 10 devient :

$$F = \frac{\sum_{i}^{n} \Delta C'_a + \Delta W \cos\alpha \tan\phi'_a}{\sum_{i}^{n} \Delta W \sin\alpha} \qquad (11)$$

Cette expression ne satisfait pas l'équilibre des forces parallèles à la base de chaque tranche. Aussi, étant donné qu'il n'est pas nécessaire de connaître la position de la force normale à la base de chaque tranche, l'équilibre des moments de chaque tranche n'est pas assuré.

Cette méthode est connue sous le nom de méthode ordinaire des tranches ou méthode de Fellenius.

Il a été montré que le coefficient de sécurité calculé selon cette méthode est inférieur à la borne inférieure calculée par Whitman et Moore (1963). Le coefficient de sécurité est généralement sous-évalué de 10 à 15 %, parfois jusqu'à 60%, par rapport à celui obtenu de méthodes plus précises telles que celles décrites ci-après.

Cette méthode est donc peu précise et elle sous-évalue la valeur du coefficient de sécurité; elle conduit à des dimensionnements peu économiques.

4. Méthode de Bishop

4.1 Méthode de Bishop modifiée

Bishop (1955) a proposé une alternative pour obtenir le coefficient de sécurité sans faire intervenir l'effet des forces entre tranches. L'équilibre général des moments est satisfait comme pour la méthode de Fellenius, cependant, l'expression de la force normale effective à la base de chaque tranche est dérivée d'une manière différente.

Dans ce cas, pour chaque tranche, l'équilibre des forces selon la direction verticale est exprimé plutôt que celui selon la normale à la base des tranches et les forces latérales entre tranches sont ignorées. La méthode considère donc, que pour chaque tranche, les forces agissant sur les faces latérales de la tranche ont une résultante verticale nulle.

On obtient, selon la Figure 3 :

$$\Delta W - \Delta S_r \sin\alpha - \Delta N' \cos\alpha = 0 \qquad (12)$$

En substituant l'expression de la résistance au cisaillement requise de l'expression (9), l'expression de la contrainte normale effective à la base de chaque tranche devient :

$$\Delta N' = \frac{\Delta W - \Delta C'_a \sin\alpha / F}{\cos\alpha \left(1 + \tan\phi'_a \tan\alpha / F\right)} \qquad (13)$$

En substituant l'expression de ΔN' dans l'expression de l'équilibre général des moments donnée dans l'expression (12) on obtient l'expression implicite suivante du coefficient de sécurité :

$$F = \frac{\sum_1^n \left[\left(\Delta C'_a \cos\alpha + \Delta W \tan\phi'_a\right) / \cos\alpha \left(1 + \tan\phi'_a \tan\alpha / F\right)\right]}{\sum_1^n \Delta W \sin\alpha} \qquad (14)$$

La valeur du coefficient de sécurité F est calculée par approximations successives, en partant d'une première valeur sélectionnée qui peut être celle obtenue par la méthode de Fellenius.

La prise en compte des efforts extérieurs revient à ajouter la somme de la composante normale de ces efforts au numérateur et à retrancher la somme de la composante tangentielle au dénominateur de l'équation (14).

Bien que la méthode simplifiée de Bishop ne permette pas de calculer directement le coefficient de sécurité comme la méthode de Fellenius, les valeurs de F obtenues par cette méthode sont beaucoup plus proches de celles obtenues par des méthodes plus précises qui prennent en compte les forces entre tranches (Whitman et Bailey, 1967).

Typiquement, la méthode de Bishop modifiée conduit à une erreur de 1% seulement par rapport à la méthode de Bishop rigoureuse, ce qui la fait préférer nettement à la méthode de Fellenius.

4.2 Méthode de Bishop rigoureuse

La première méthode rigoureuse capable d'analyser des surfaces de rupture circulaires pour des pentes dans des sols frottants et cohérents a été proposée par Bishop (1955). La méthode satisfait complètement les équations d'équilibre et fournit un moyen d'évaluer la validité de toute solution qui pourrait être proposée.

Dans cette méthode rigoureuse, les forces entre tranches sont prises en compte dans l'expression de la force effective normale agissant sur la base de la tranche.

En écrivant, selon la Figure 4, l'équilibre des forces agissant sur une tranche selon la direction verticale, on obtient :

$$\Delta W + \Delta X - \Delta S_r \sin\alpha - \Delta N' \cos\alpha = 0 \qquad (15)$$

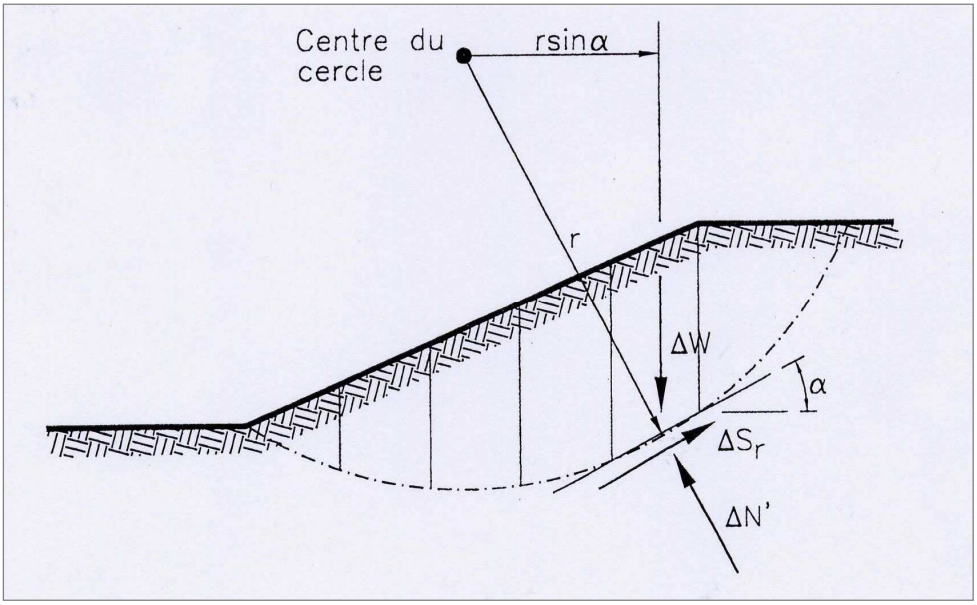


Figure 4: Forces considérées pour la méthode ordinaire des tranches

ΔX étant la différence entre les deux forces de cisaillement agissant sur les faces latérales verticales de la tranche.

En substituant l'expression de la résistance au cisaillement de l'équation (9) dans l'équation (15) de l'équilibre des forces selon la verticale et en exprimant la force normale effective, on obtient :

$$\Delta W + \Delta X - \frac{\left(\Delta C'_a + \Delta N' \tan \phi'_a\right)}{F} \sin\alpha - \Delta N' \cos\alpha = 0$$

$$\Delta W + \Delta X - \Delta C'_a \sin\alpha / F - \Delta N' \cos\alpha \left(1 + \tan\phi'_a \tan_a / F\right) = 0$$

$$\Delta N' = \frac{\Delta W + \Delta X - \Delta C'_a \sin\alpha / F}{\cos\alpha \left(1 + \tan\phi'_a \tan\alpha / F\right)} \qquad (16)$$

En substituant cette expression dans l'équation (8) d'équilibre général des moments, on obtient pour F :

$$F = \frac{\sum_1^n \Delta C'_a \cos\alpha + \left(\Delta W + \Delta X\right) \tan\phi'_a}{\sum_1^n \Delta W \sin\alpha} \qquad (17)$$

Si l'équilibre interne est satisfait, les forces internes doivent satisfaire les conditions aux limites suivantes :

$$\sum_{1}^{n} \Delta X = X_o - X_n \qquad (18a)$$

$$\sum_{n}^{n} \Delta E' = E_o' - E'_n \qquad (18b)$$

Avec :

- ΔE', la différence entre les deux forces effectives normales agissant sur les faces latérales verticales de chaque tranche et, selon la Figure 5 :

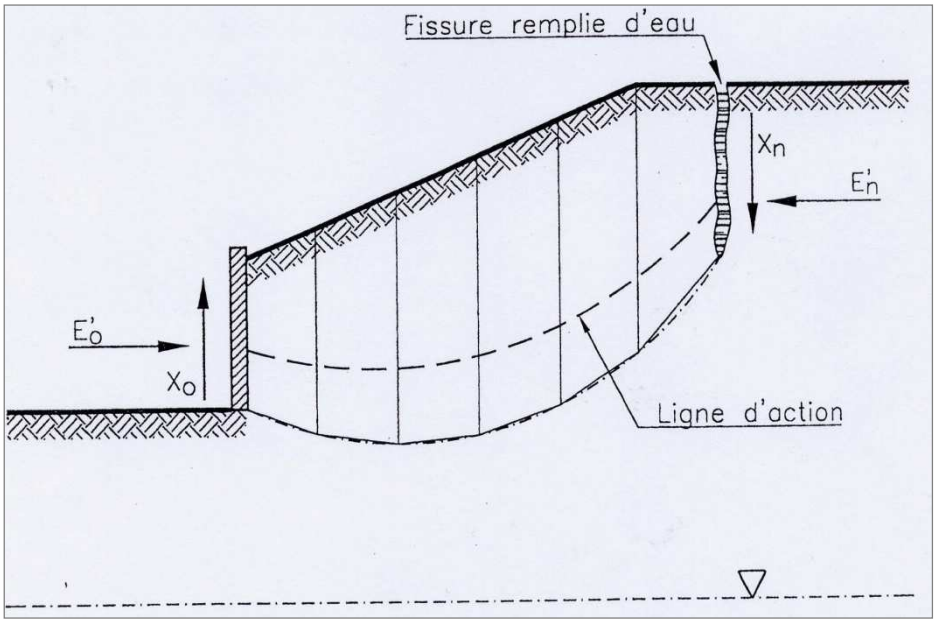


Figure 5 : Forces agissant sur les tranches d'extrémité

- X_0, E'_0 la force de cisaillement et la force normale effectives agissant sur la frontière gauche de la masse en glissement.

- X_n, E'_n la force de cisaillement et la force normale effectives agissant sur la frontière droite de la masse en glissement.

Selon la Figure 3, en sommant les forces parallèles à la base de chaque tranche, l'équation d'équilibre des forces dans une direction indépendante de la direction verticale utilisée précédemment est obtenue :

$$(\Delta W + \Delta X)\sin\alpha + \Delta E'\cos\alpha - \Delta S_r = 0$$

$$\Delta E' = \Delta S_r / \cos\alpha - (\Delta W + \Delta X)\tan\alpha \qquad (19)$$

Puis en sommant pour toutes les tranches :

$$\sum_{1}^{n} \Delta E' = \sum_{1}^{n} \left[\Delta s_r / \cos\alpha - (\Delta W + \Delta X)\tan\alpha \right]$$

Et avec la condition exprimée dans l'équation (18b) :

$$\sum_{1}^{n} \left[\Delta S_r / \cos\alpha - (\Delta W + \Delta X)\tan\alpha \right] = E'_o - E'_n \qquad (20)$$

Si des valeurs de ΔX satisfont simultanément aux expressions (17), (18a) et (20), alors, pour chaque tranche, l'équilibre des forces verticales et celui des forces dans une autre direction est assuré et, pour l'ensemble, l'équilibre général des moments est satisfait.
L'équilibre des moments des tranches prises individuellement n'a pas été considéré pour arriver à l'expression du coefficient de sécurité donnée dans l'expression (17).

L'utilisation de n-1 équations d'équilibre des moments des tranches prises individuellement permet de déterminer la position de la ligne de poussée, lieu d'application des forces E' tel que défini sur la Figure 3.

Etant donné que l'équilibre global des moments a été considéré, une équation d'équilibre des moments d'une tranche individuelle est surabondante et non utilisée.

Une hypothèse doit être faite quant à la position des forces effectives normales, ΔN, situées à la base de chaque tranche dans le but d'établir d'équation d'équilibre des moments pour chaque tranche.

Bishop (1955) a fait l'hypothèse que ΔN' est située au centre de la base de chaque tranche.

Le poids de chaque tranche, ΔW, lui aussi a été pris au centre de la tranche pour l'expression de l'équilibre des moments, ce qui apparaît implicitement dans l'équilibre global des moments de l'expression (3).

Si, selon la Figure 3, la somme des moments est faite par rapport au point médian de la base de chaque tranche, alors la contribution du poids, ΔW, et celle de la force normale effective, ΔN', disparaissent dans l'équation des moments et l'équation d'équilibre devient :

$$E'\left[\left(y'_t - Y\right) - \frac{\Delta y}{2}\right] - \left(E' + \Delta E'\right)\left[\left(y'_t + \Delta y'_t\right) - \left(y + \Delta y\right) + \frac{\Delta y}{2}\right] + X\,\frac{\Delta x}{2} + \left(X + \Delta X\right)\frac{\Delta x}{2} = 0 \qquad (21)$$

Avec :

- Δx, la largeur de la tranche
- Δy et Δy't, les changements incrémentaux au travers de la largeur de la tranche des fonctions définissant respectivement la surface de glissement y(x) et la ligne de poussée effective y't(x)

En résolvant par rapport à la ligne de poussée effective, l'expression suivante est obtenue :

$$\left(y'_t + \Delta y'_t\right) = \frac{E'\,y'_t\;\Delta E'\left(y + \frac{\Delta y}{2}\right) + X\;\Delta x + \Delta X\,\frac{\Delta x}{2}}{E' + \Delta E'} \qquad (22)$$

Le calcul de la position de la ligne de poussée effective est effectué successivement, tranche après tranche.

Pour la première tranche, l'effort de cisaillement X et la force normale effective E' sont respectivement les forces X_o et E'_o données par les conditions aux limites. La position de la ligne de poussée effective sur le côté gauche de la première tranche, y'_t, coïncide avec la force E'_o. Si E'_o n'existe pas, y'_t est situé à la base de la surface de glissement de la première tranche.

Les valeurs calculées de X + ΔX, E' + ΔE' et $y'_t + \Delta y'_t$ deviennent les valeurs X, E' et y'_t pour la tranche suivante. Le procédé est répété pour toutes les tranches. La valeur de ΔE' de chaque tranche est calculée à partir de l'expression (19).

La position de la ligne de poussée permet d'apprécier si la solution est acceptable. Il y a un nombre infini de choix pour les valeurs de ΔX qui vont satisfaire pleinement l'équilibre. Si le choix fait conduit à une solution qui a une ligne de poussée entièrement située dans la masse en glissement, ce qui implique sans zones de tension du sol, alors la solution devrait être acceptable.

Un autre critère servant à déterminer si une solution qui satisfait pleinement les conditions d'équilibre est raisonnable ou pas est la présence ou non de contraintes de cisaillement élevées entre tranches.

La solution ne sera pas acceptable si la contrainte de cisaillement entre tranches dépasse la résistance au cisaillement du sol le long de la surface verticale de contact.
La conformité à cette condition n'est généralement pas suffisante. La contrainte de cisaillement critique se produit généralement selon un plan incliné (Seed et Sultan, 1967). Si la résistance au cisaillement mobilisée le long d'un plan vertical est nettement en dessous de la résistance mobilisable selon ce plan, on peut supposer que la solution est adéquate (Whitman et Bailey, 1967).

Bishop (1955) a trouvé que, bien qu'une infinité de valeurs de ΔX satisfasse à l'ensemble des conditions d'équilibre, la variation des valeurs du coefficient de sécurité est insignifiante. Ainsi, la vérification de la position de la ligne de poussée ou du cisaillement entre tranches n'est pas toujours justifiée étant donné la quantité de travail requis pour satisfaire ces critères en tout point.

4.3 Méthode de Bishop modifiée étendue : Méthode de Carter

Les méthodes exposées précédemment sont applicables à des surfaces de rupture circulaires. Dans le cas de surfaces de rupture de forme quelconque, la méthode de Carter (1971) est utilisée. Cette méthode possède l'avantage de s'appliquer à toutes les surfaces de rupture, y compris aux surfaces planes.

Carter a démontré que, dans le cas où il est fait l'hypothèse que ΔX = 0 dans la Figure 3, la valeur du facteur de sécurité, déterminée en satisfaisant l'équilibre global des moments et l'équilibre des forces verticales appliquées aux tranches individuelles, variait suivant la position du point par rapport auquel l'équilibre global des moments était satisfait.

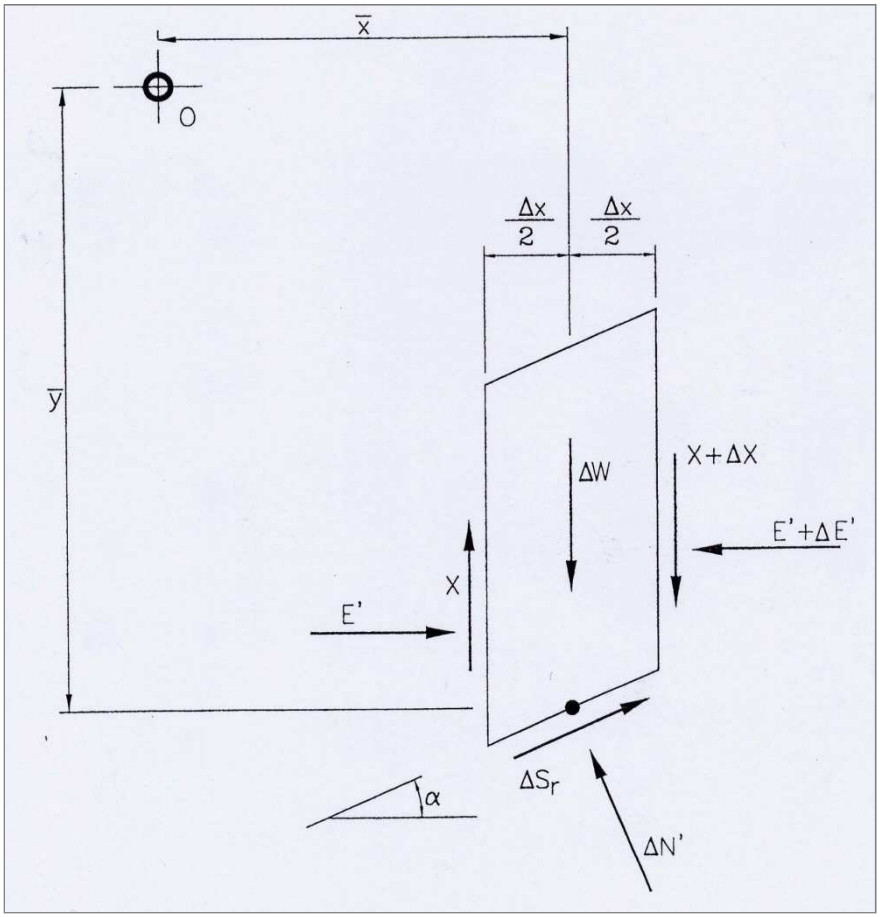


Figure 6 : Forces dans une tranche par rapport à un point arbitraire

Selon la Figure 6, en sommant les moments par rapport à un point arbitraire O, l'expression suivante de l'équilibre des moments est obtenue :

$$\sum_{1}^{n}\left[\Delta N'\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)+W\bar{x}-\Delta S_r\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)\right]=0 \qquad (23)$$

Avec $\bar{x}$ et $\bar{y}$ les distances horizontale et verticale entre le point O et le point médian de la base de chaque tranche.

L'expression de la force de cisaillement résistante de l'expression (9) est ensuite remplacée dans l'expression (23) et ΔN'est substitué par sa valeur donnée dans l'expression (16).

Après arrangement, simplification et transposition du terme ΔX, l'expression suivante contenant n+1 inconnues (F et n valeurs de ΔX) est obtenue :

$$\sum_{1}^{n}\bar{y}\,\frac{\Delta C'_a/\cos\alpha+\Delta W\left(\tan\phi'_a-F\tan\alpha\right)}{F+\tan\alpha\tan\phi'_a}=\sum_{1}^{n}\bar{y}\,\Delta X\left[\frac{F\tan\alpha-\tan\phi' a}{F+\tan\alpha\tan\phi' a}-\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right] \qquad (24)$$

Si l'hypothèse ΔX=0 est faite, l'expression (24) est réduite à l'expression suivante :

$$\sum_{1}^{n}\bar{y}\,\frac{\Delta C'_a/\cos\alpha+W\left(\tan\phi'_a-F\tan\alpha\right)}{F+\tan\alpha\tan\phi'_a}=0 \qquad (25)$$

Le facteur de sécurité est exprimé de façon implicite.

Bien que cette valeur soit indépendante de la position horizontale du point par rapport auquel l'équilibre des moments est réalisé, elle dépend de la position verticale de ce point.

Carter (1971) a montré que quand y tend vers l'infini, la valeur du facteur de sécurité tend vers une valeur asymptotique minimum.

Lorsque y tend vers l'infini, y est retiré de l'expression (25) et l'égalité devient :

$$\sum_{1}^{n}\frac{\Delta C'_a/\cos\alpha+\Delta W\left(\tan\phi'_a-F\tan\alpha\right)}{F+\tan\alpha\tan\phi'_a}=0 \qquad (26)$$

Cette expression satisfait l'équilibre des forces dans la direction verticale pour chaque tranche et l'équilibre horizontal global. Il ne satisfait pas l'équilibre des moments des tranches individuelles.

La valeur du facteur de sécurité est conservatrice par rapport à des solutions raisonnables obtenues par des méthodes plus précises qui satisfont entièrement aux conditions d'équilibre.

Le développement complet de la méthode avec prise en compte de l'ensemble des forces généralement rencontrées dans les problèmes de stabilité de pentes est donné dans l'Annexe E. Les forces considérées pour l'analyse sont indiquées sur la Figure 7.

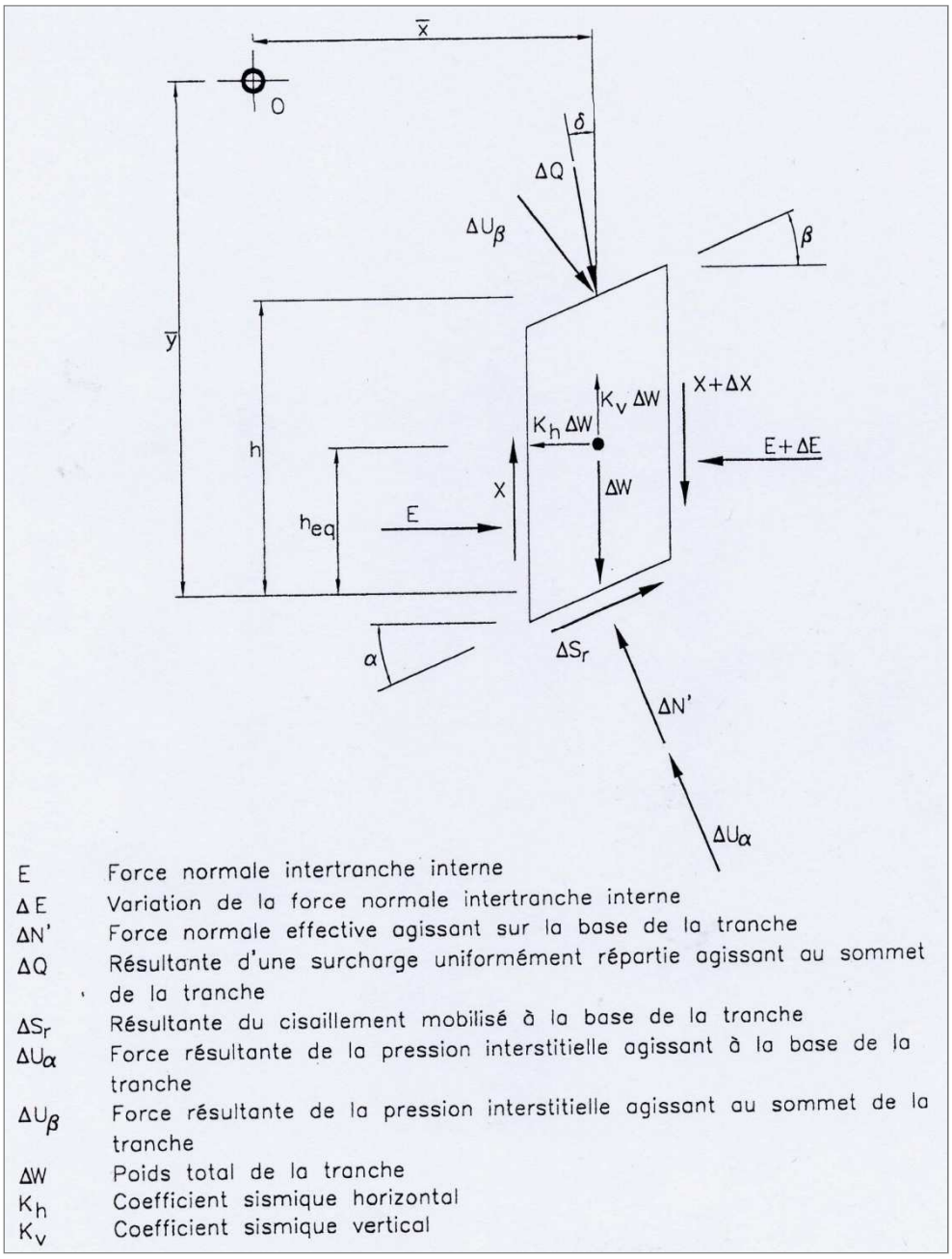


Figure 7 : Forces prises en compte pour la modélisation numérique

Lorsque la coordonnée y du point par rapport auquel est effectué l'équilibre général des moments tend vers l'infini, l'expression finale du développement devient :

$$\sum_{1}^{n} \frac{A_1 - FA_2}{F + A_3} = 0 \qquad (27)$$

Dans le logiciel, les surfaces non circulaires sont calculées avec la méthode de Carter en tenant compte du bras de levier y du point par rapport auquel on écrit l'équilibre des moments. L'utilisateur a néanmoins la possibilité s'il le désire de ne pas tenir compte du bras de levier : c'est la différence entre la méthode de CARTER étendue et la méthode de CARTER simplifiée.

Les expressions A1, A2 et A3 étant :

$$A_1 = C'_a / \cos\alpha + \tan\phi'_a \left[W \left(1 - k_v - k_h \tan\alpha\right) - U_\alpha / \cos\alpha + U_\beta \left(\cos\beta + \tan\alpha \sin\beta\right) + Q \left(\cos\delta + \tan\alpha \sin\delta\right) \right]$$

$$A_2 = W \left[\left(1 - k_v\right) \tan\alpha + k_h \right] + U_\beta \left(\tan\alpha \cos\beta - \sin\beta\right) + Q \left(\tan\alpha \cos\delta - \sin\delta\right)$$

$$A_3 = \tan\alpha \tan\phi'_a$$

Avec :

- k_h, coefficient sismique horizontal
- k_v, coefficient sismique vertical
- U_α, la résultante de la poussée de l'eau agissant à la base de la tranche
- U_β, la résultante de la poussée de l'eau agissant au sommet de la tranche
- Q, la résultante de la surcharge superficielle agissant sur la tranchée
- β, l'inclinaison de la face supérieure de la tranche
- α, l'inclinaison de la face inférieure de la tranche
- δ, l'inclinaison de la résultante Q

5. Méthode des perturbations

5.1 Principe

Dans la plupart des cas, la modélisation impose de décomposer la surface de glissement selon des tranches. Quelle que soit la méthode considérée (Bishop pour les surfaces de ruptures circulaires ou Carter pour les surfaces non-circulaires), il réside que les inconnues pour une tranche de sol donnée, sont la contrainte normale sous la base de la tranche, ainsi que la contrainte tangentielle à la base de la tranche ; ces contraintes correspondant, en réalité, aux efforts liant le volume en glissement et le volume "fixe". D'autre part, la discrétisation en tranches laisse des inconnues supplémentaires, liées aux efforts inter-tranches, et la plupart des méthodes émettent des hypothèses sur ces efforts.

La méthode des perturbations, élaborée au L.C.P.C. par MM. RAULIN, ROUQUES et TOUBOL (1974), permet de corriger la contrainte normale σ_0 calculée par une méthode simple et approximative. Pour cela, un coefficient perturbateur de la forme $(\lambda + \mu\nu)$ est réintroduit au niveau de la contrainte normale, dans les équations d'équilibre, afin d'estimer la manière dont réagit le système à la perturbation entrée. Il s'agit de la seule méthode permettant de vérifier les 3 équations de base (équilibre horizontal, vertical et des moments) tranche par tranche, et donc d'optimiser la vérification de la stabilité des pentes. Elle s'applique au calcul des surfaces circulaires ou non.

5.2 Mise en équations

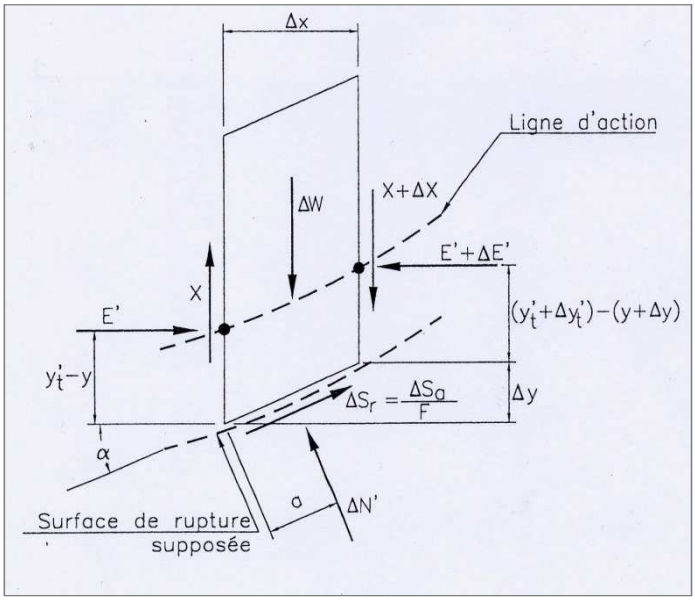


Figure 8: Forces agissant sur une tranche

La méthode des perturbations impose que l'équilibre de chaque tranche soit assuré horizontalement, verticalement et au niveau des moments par rapport à n'importe quel point, ce qui donne, en sommant sur les tranches :

- efforts horizontaux : $\int \Delta W - \int \Delta N.\cos\alpha - \int \Delta Sr.\sin\alpha + \int \Delta X = 0$
- efforts verticaux : $\int \Delta E' - \int \Delta N.\sin\alpha - \int \Delta Sr.\cos\alpha + \int \Delta U = 0$
- moments au point O : $\int x.(\Delta W - \Delta N.\cos\alpha - \Delta Sr.\sin\alpha + \Delta X) + \int y.(\Delta E' - \Delta N.\sin\alpha - \Delta Sr.\cos\alpha + \Delta U) = 0$

Avec :

- ΔW : poids de la tranche de sol
- $\Delta N = \sigma_0.(\lambda+\mu\nu)\ (\Delta x / \cos\alpha)$: effort dû à la contrainte normale sous la base de la tranche
- α : angle entre la base de la tranche et l'horizontale
- Δx : épaisseur de la tranche
- $\Delta Sr : (\Delta N.\tan\varphi + c) / \Gamma$: effort résistant dû à la contrainte tangentielle sous la base de la tranche
- φ : angle de frottement interne à la base de la tranche
- c : cohésion à la base de la tranche
- Γ : facteur de sécurité vis-à-vis de la stabilité
- ΔX : efforts verticaux inter-tranches

- ΔE' : efforts horizontaux inter-tranches
- ΔU : efforts horizontaux dus à l'eau, permettant de modéliser les écoulements

Le théorème de transport des moments permet de choisir n'importe quel point pour la détermination du moment, puisque le raisonnement impose que la force transportée soit nulle, par l'écriture des efforts horizontaux et verticaux. En isolant λ et μ dans les équations précédentes, on obtient un système d'équations linéaire en λ et μ.

$$\begin{pmatrix} H1+\frac{H2}{\Gamma} & H3+\frac{H4}{\Gamma} & H5+\frac{H6}{\Gamma} \\ V1+\frac{V2}{\Gamma} & V3+\frac{V4}{\Gamma} & V5+\frac{V6}{\Gamma} \\ O1+\frac{O2}{\Gamma} & O3+\frac{O4}{\Gamma} & O5+\frac{O6}{\Gamma} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ce système admet une solution non triviale si le déterminant de la matrice contenant Γ est nul, ce qui donne une équation de degré 3 aisée à résoudre avec les méthodes classiques (méthode de Cardan, par exemple).

5.3 Choix de σ_0 et ν

A l'origine, le choix s'était porté sur un couple (σ_0 ; ν) égal à (ΔW.cos 2α ; tan α) ; σ_0 était alors égale à la contrainte de Fellenius. Cependant, la contrainte calculée ainsi étant assez éloignée de la contrainte réelle dans le sol, le coefficient de perturbation n'est alors pas suffisant pour retrouver la contrainte réelle. Cette réserve est encore plus importante lorsque des efforts extérieurs sont appliqués sur la tranche (surcharge, ...).
Après recherches, il est apparu que le choix optimal pour σ_0 et ν était :

$$\sigma_0 = \frac{\left(\frac{\Delta W + F_v}{dx}\right) + c.\cot\varphi}{1+\sin\varphi.\cos\left(2a-\varphi-\frac{\pi}{2}\right)} \cdot cos^2\varphi - c\cdot cot\varphi - \frac{(dU+F_h)}{dx}$$

$$\nu = \tan\alpha$$

L'expression de σ_0 provient du calcul trigonométrique dans le cercle de Mohr, en supposant que la contrainte n'est pas une contrainte principale.
La prise en compte d'une contrainte initiale de cette forme permet :

- d'affiner la contrainte calculée initialement, puisqu'elle représente l'état réel de contraintes dans le sol ;
- de mieux prendre en compte l'augmentation de la contrainte dans le sol dû aux efforts extérieurs verticaux (F_v) comme horizontaux (F_h) (surcharges, ancrages, ...).

6. Modélisation

6.1 Coefficients de sécurité partiels

Le programme permet d'effectuer les calculs selon la méthode traditionnelle avec un coefficient de sécurité global ou selon les méthodes des coefficients de sécurité partiels selon les recommandations des Eurocodes 7 (NF P 94-270) et CLOUTERRE (coefficients pondérateurs sur les actions et sur la méthode et des coefficients de sécurité partiels sur certains paramètres de résistance des matériaux).

6.1.1 *Recommandations CLOUTERRE*

Les valeurs des coefficients pondérateurs sur les actions et sur la méthode des recommandations CLOUTERRE 91 sont données dans l'Annexe C en fonction de la nature des actions pour les combinaisons fondamentales et accidentelles pour des ouvrages courants et sensibles.

La formulation du facteur de sécurité global selon la méthode de Fellenius telle que donnée dans l'équation (11) est :

$$F = \frac{\sum_{1}^{n}\left(\Delta C'_a + \Delta W \cos\alpha \tan\phi'_a\right)}{\sum_{1}^{n}\Delta W \sin\alpha}$$

Selon la formulation aux E.L.U., l'expression devient :

$$\Gamma_{Fell} = \frac{\sum_{1}^{n}\left(\frac{\Delta C'_a}{\Gamma c'} + \Gamma s_1 \ \Delta W \cos\alpha \frac{\tan\phi'_a}{\Gamma\phi'}\right)}{\Gamma s_3 \sum_{1}^{n} \Gamma s_1 \Delta W \sin\alpha} \qquad (28)$$

De même, la formulation du facteur de sécurité global selon la méthode de Bishop modifiée donnée dans l'équation (14) :

$$F = \frac{\sum_{1}^{n}\left[\frac{\left(\Delta C'_a \cos\alpha + \Delta W \tan\phi'_a\right)}{\cos\alpha\left(1+\tan\phi'_a \tan\alpha / F\right)}\right]}{\sum_{1}^{n}\Delta W \sin\alpha}$$

devient, quand elle est exprimée selon la formulation aux E.L.U. :

$$\Gamma_{Bish} = \frac{\sum_{n}^{n}\left[\frac{\left(\frac{\Delta C'_a}{\Gamma c'} + \Gamma s_1 \Delta W \frac{\tan\phi'_a}{\Gamma\phi'}\right)}{\cos\alpha\left(1+\frac{\tan\phi'\tan\alpha}{\Gamma\phi'\,\Gamma Bish\,\Gamma s_3}\right)}\right]}{\Gamma s_3 \sum_{1}^{n} \Gamma s_1 \Delta W \sin\alpha} \qquad (29)$$

6.1.2 *Eurocodes 7*

Les vérifications aux états limites sont calculées avec les combinaisons d'actions proposées par de la norme NF EN 1997-1 et la Norme d'application française NF 94 270. Les coefficients partiels pour le calcul des ouvrages en remblai renforcé et des massifs en sol cloué sont donnés dans l'Annexe C en fonction des différentes approches.

Les vérifications minimales à effectuer aux états limites ultimes pour les situations de projet durables ou transitoires sont données dans le tableau ci-dessous :

		ELU type	Approche
Justification de la géométrie du massif			
Stabilité externe	Glissement sur sol support	GEO	2
	Poinçonnement du sol support	GEO	2
Stabilité Générale		GEO	3
Justification de la distribution des renforcements et du parement			
Stabilité interne	Résistance en traction	STR	2
	Résistance d'interaction	STR	2
	Résistance du parement	STR	2
Stabilité mixte		GEO	3

La vérification de la stabilité mixte d'un ouvrage en sol renforcé concerne les lignes de rupture potentielle par grand glissement qui interceptent et/ou longent au moins un des lits de renforcement. Elle doit prendre en compte la contribution de ces renforcements et de leurs dispositifs de liaison au parement.

6.2 Paramètres de sol

Chaque sol est décrit par les paramètres isotropes suivants :
Le poids volumique apparent humide, le poids volumique saturé et les paramètres de résistance c et ϕ de l'enveloppe de Mohr-Coulomb et le frottement latéral unitaire limite entre le sol et les inclusions.

Le poids volumique apparent humide et le poids volumique saturé sont des poids totaux et les deux sont utilisés pour permettre au programme la prise en compte des zones traversées par un niveau d'eau.
Dans le cas où le sol est entièrement situé au-dessus du niveau d'eau, le poids volumique saturé n'est pas utilisé mais une valeur de poids volumique doit être néanmoins introduite. N'importe quelle valeur, y compris zéro est acceptée par le programme.

De la même manière pour le cas où la zone de sol est entièrement submergée, le poids apparent humide ne sera pas utilisé. A nouveau, une valeur doit cependant être introduite pour ce paramètre.

Des analyses en contraintes effectives ou en contraintes totales peuvent être effectuées en utilisant les paramètres de résistance de Mohr-Coulomb appropriés, à savoir (c', ϕ') pour les analyses en contraintes effectives et (c_u, ϕ_u) pour les analyses en contraintes totales.

En cas de calcul sous séisme en pseudo-statique, les paramètres de sol adéquats doivent être pris en compte : les paramètres (c_u, ϕ_u) sont généralement adoptés conformément aux recommandations du paragraphe 9.24 de l'AFPS 90.

6.3 Prise en compte de l'eau

Il y a cinq différentes manières de prendre en compte les pressions interstitielles :

(1) En définissant point par point un niveau de nappe tel que décrit sur la figure 17 ci-dessous. Le niveau de la nappe est schématisé par une série de points reliés les uns aux autres par des segments de droite. Il est recommandé d'étendre latéralement la définition du niveau de la nappe jusqu'aux limites latérales des couches de sol.

La ligne du niveau de la nappe peut se trouver soit au-dessus de la surface du terrain, soit au-dessous; elle peut aussi coïncider avec la surface du terrain. Ceci permet non seulement de définir un niveau de nappe souterraine mais aussi des surfaces d'écoulement ainsi que des masses d'eau au repos telles que des lacs ou des cours d'eau.

La pression interstitielle en chaque point sous la surface de la nappe est calculée à partir de la charge qui est la distance verticale entre le point en question et le niveau d'eau. S'il y a un gradient, cette hypothèse est généralement sécuritaire. Cependant, dans la zone d'un écoulement, cette hypothèse n'est pas du côté de la sécurité. La présence de pressions artésiennes à l'intérieur d'un sol constitué de couches hétérogènes complique davantage la validité de l'hypothèse. Etant donné que l'erreur peut être importante pour certains types d'écoulement, certaines méthodes de prise en compte des pressions interstitielles sont plus appropriées. Ces méthodes sont décrites ci-après.
Lorsque la surface de l'eau est située au-dessus de la surface du terrain, il est fait l'hypothèse que des pressions hydrostatiques sont appliquées à la surface du sol.

(2) La pression interstitielle peut être reliée au coefficient de pression interstitielle, r_u, tel que défini sur la figure 17, r_u étant le rapport entre la pression interstitielle et la contrainte verticale totale. La contrainte verticale totale ne prend pas en compte les surcharges appliquées à la surface du sol.

(3) La pression interstitielle peut être exprimée sous la forme d'une pression constante, U, en n'importe quel point à l'intérieur d'un sol donné.

(4) La pression interstitielle peut être définie point par point dans un semis de point pouvant résulter d'un calcul type différences finies ou éléments finis.

Les options sous (2), (3) et (4) peuvent être utilisées indépendamment ou de façon combinée, avec ou sans l'option d'un niveau d'eau tel que décrit sous (1).

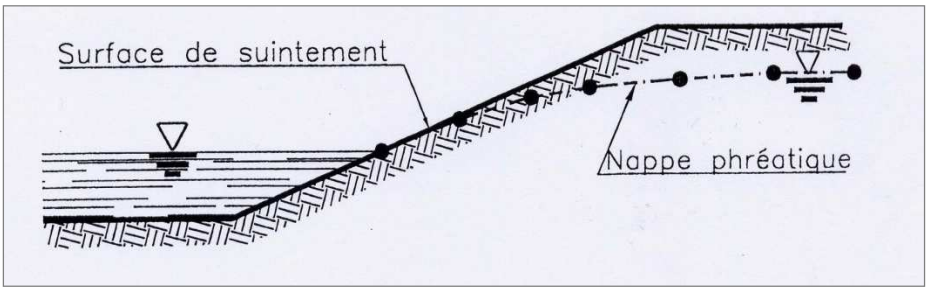


Figure 9 : Définition de la nappe sur la totalité des abscisses.

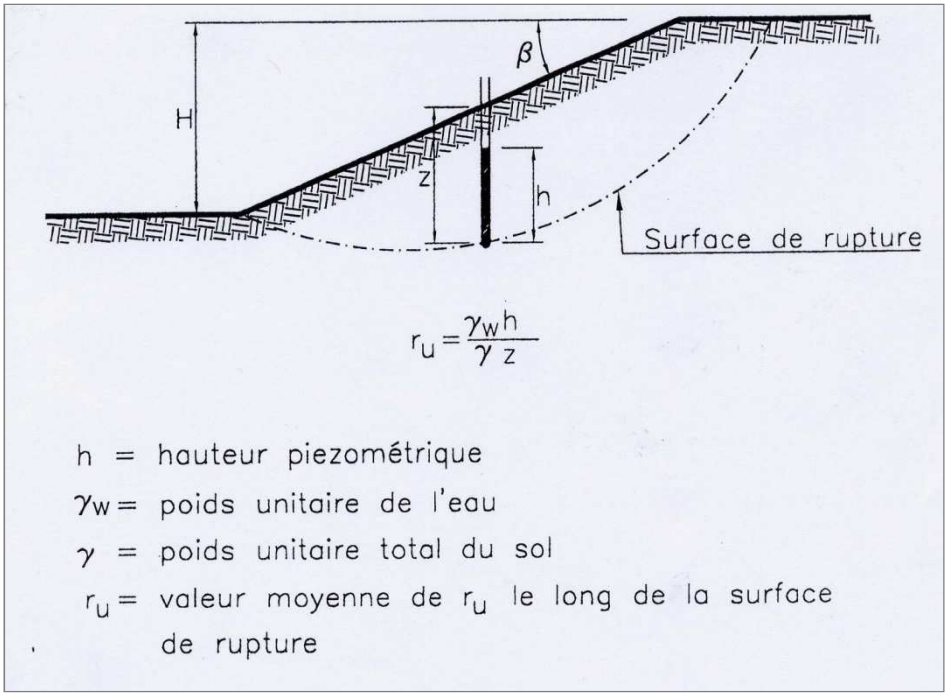

β
H
z
h
Surface de rupture
$r_u = \frac{\gamma_w h}{\gamma z}$
h = hauteur piezométrique
γ_w = poids unitaire de l'eau
γ = poids unitaire total du sol
r_u = valeur moyenne de r_u le long de la surface de rupture

Figure 10 : Définition du coefficient r_u.

6.4 Prise en compte des inclusions

6.4.1 *Types d'inclusions*

Plusieurs types d'inclusions peuvent être pris en compte par le programme GEOSTAB. Ces inclusions sont schématisées sur la Figure 18. Elles comprennent:

- les clous ou épingles d'une paroi clouée (1)
- les tirants (2) d'un soutènement constitué d'un rideau de palplanches ou de pieux (3)
- une nappe de géotextile (4) à l'interface entre une couche compressible et un remblai
- des colonnes de gravier (5) pour améliorer les caractéristiques de compressibilité et de résistance de couches de mauvaise qualité
- des micropieux (6) pour l'épinglage de surfaces de rupture

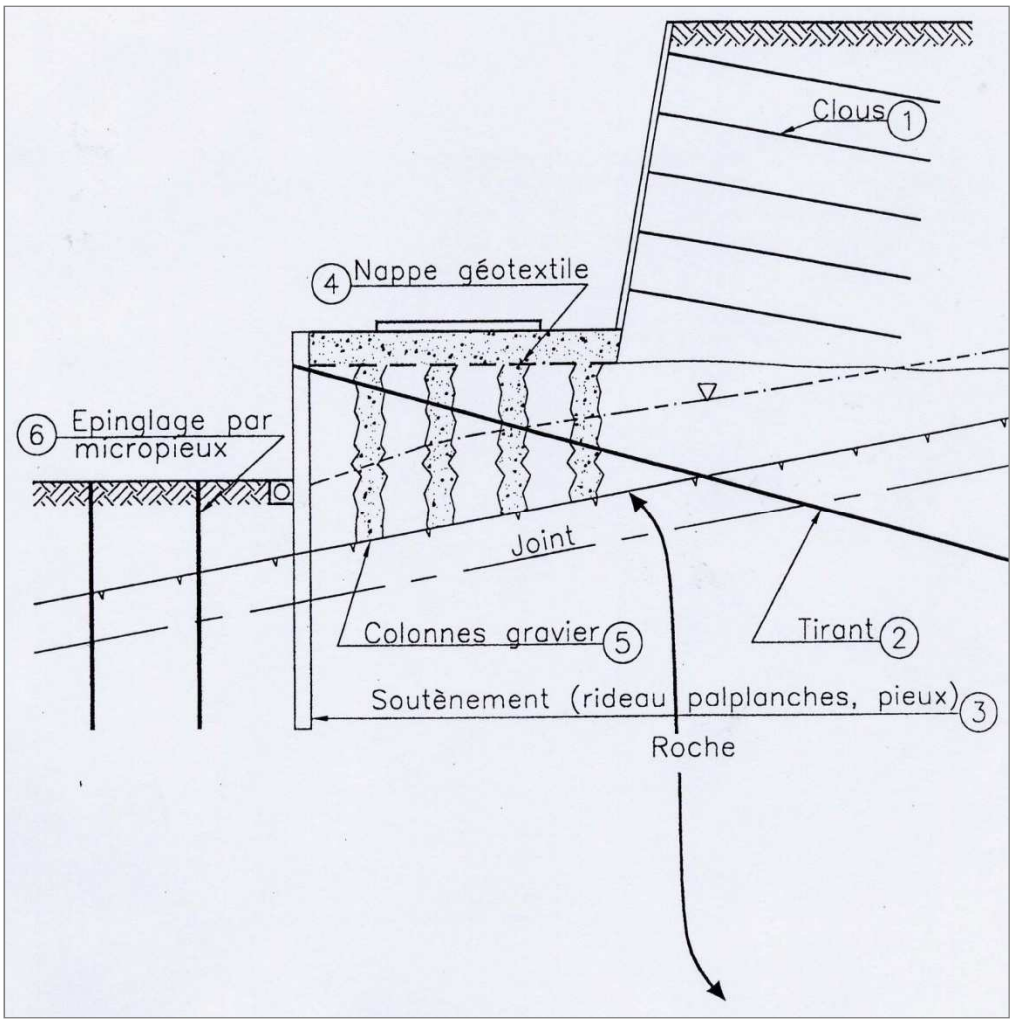


Figure 11 : Types d'inclusions prises en compte par Geostab.

6.4.2 *Sollicitation d'une inclusion, prise en compte dans les calculs de stabilité.*

Le comportement d'une inclusion qui est traversée par une surface de rupture a été décrit par Blondeau, Christiansen, Guilloux et Schlosser (1984). L'interaction entre le sol et l'inclusion est décrite sur la Figure 19.

Les efforts dans l'inclusion sont :

- Tn, l'effort normal dans l'axe de l'inclusion qui engendre de la traction ou de la compression
- Tc, l'effort tranchant perpendiculaire à l'axe de l'inclusion qui engendre du cisaillement
- M, le moment de flexion dans l'inclusion

Il est admis que l'inclusion se comporte comme une poutre sur appuis élastiques et que sa déformée est symétrique par rapport à la surface de rupture.

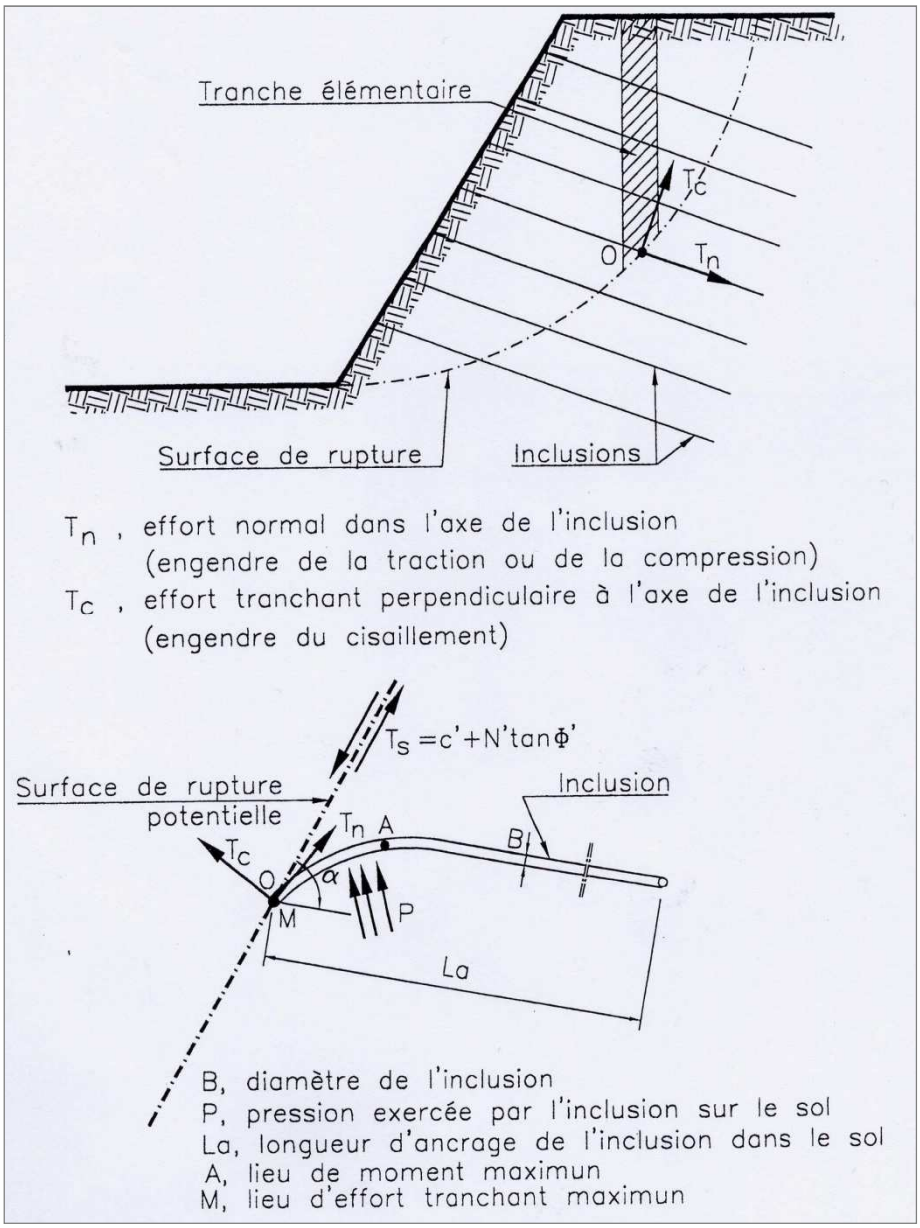


Figure 12 : Interaction sol / inclusion.

Deux points sont considérés pour les conditions extrêmes des efforts :
Au point 0, intersection avec la surface de rupture, le moment de flexion est nul et l'effort de cisaillement dans l'inclusion est maximum. Au point A de courbure maximum, le moment de flexion dans l'inclusion est maximum et l'effort de cisaillement est nul.

Pour tenir compte des inclusions dans les calculs de stabilité par les différentes méthodes (Fellenius, Bishop, Carter), il faut introduire dans les équations d'équilibre statique, les efforts mobilisables dans les inclusions au point d'intersection entre l'inclusion et la surface potentielle de rupture considérée. Ces efforts doivent être compatibles avec la résistance propre du matériau constituant l'inclusion et les efforts d'interaction entre l'inclusion et le sol qui l'entoure. [(1)]

[1] L'approche modélisée dans GEOSTAB est celle proposée par Blondeau, Christiansen, Guilloux et Schlosser (1984). Cependant l'attention de l'utilisateur est attirée sur le fait que la prise en compte selon cette approche a été largement mise en cause, notamment par Bridle (1989), Jewell & Pedley (1990) et Bridle (1990).

La résistance propre du matériau de l'inclusion ne doit pas être dépassée au point 0 où les efforts T_c et T_n sont maximums et au point A où le moment de flexion M dans l'inclusion est maximum. De plus, les efforts T_c, T_n et M ne peuvent être supérieurs aux efforts limites qui peuvent être développés dans l'interaction entre l'inclusion et le sol à savoir :

- Pour l'effort T_n, l'effort d'arrachage de l'inclusion qui est égal à l'adhérence sol-inclusion sur la longueur La située entre la surface potentielle de rupture et l'extrémité de l'inclusion.

- Pour les efforts T_c et M, une pression de contact sol-inclusion qui ne peut dépasser la pression limite du sol, p_l, telle qu'elle peut être déterminée au pressiomètre par exemple.

La représentation graphique du critère global de rupture sol-inclusion est donnée sur la Figure 20. Ce critère établit la surface enveloppe inférieure des trois surfaces correspondant aux critères de rupture énoncés précédemment (résistance propre de l'inclusion, interaction par pression de contact, interaction par frottement latéral). Chacun de ces critères est analysé ci-dessous.

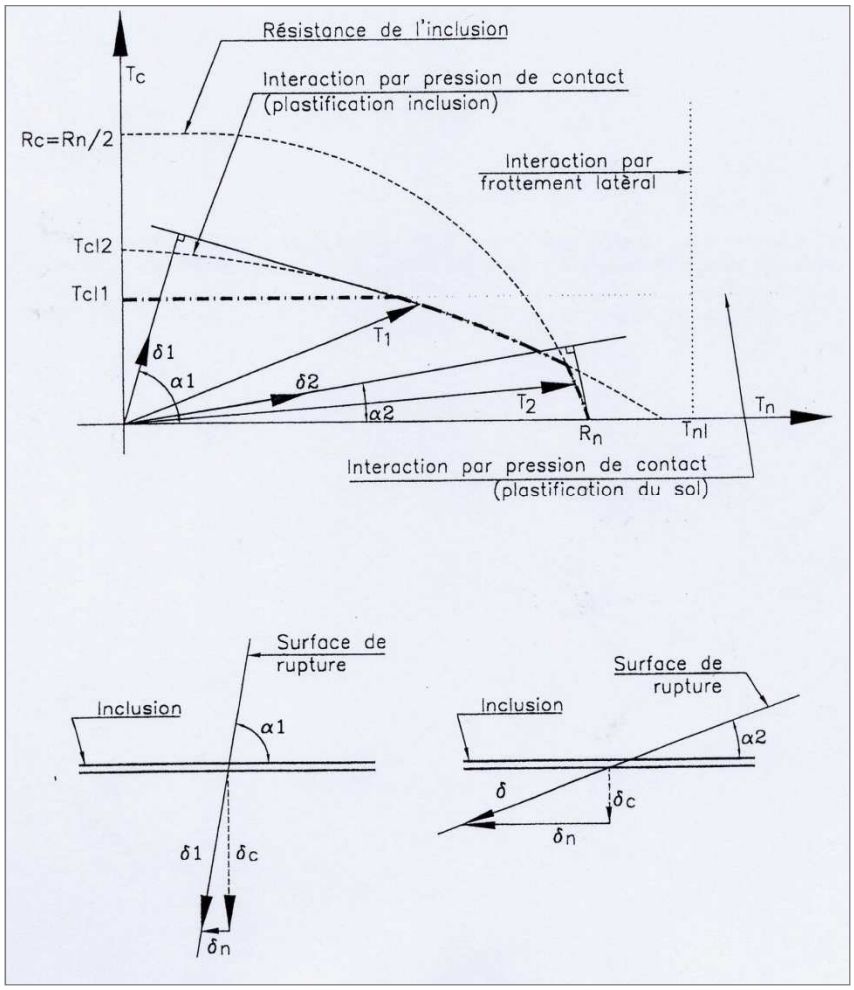


Figure 13: Définition du multicritère pour les inclusions.

6.4.3 *Résistance propre de l'inclusion*

L'état de contraintes limite pour les conditions de résistance propre de l'inclusion est indiqué sur la Figure 21. Il est fait l'hypothèse d'une distribution uniforme des contraintes normales et de cisaillement au travers de la section S de l'inclusion selon la surface potentielle de rupture A-A considérée normale à l'axe de l'inclusion.

L'état de contraintes dans l'inclusion correspondant aux efforts Tn et Tc au droit de la surface potentielle de rupture A-A est celui représenté par le cercle de Mohr de la Figure 21. Il considère que la contrainte τ'_A normale à la face perpendiculaire à la surface A-A est nulle.

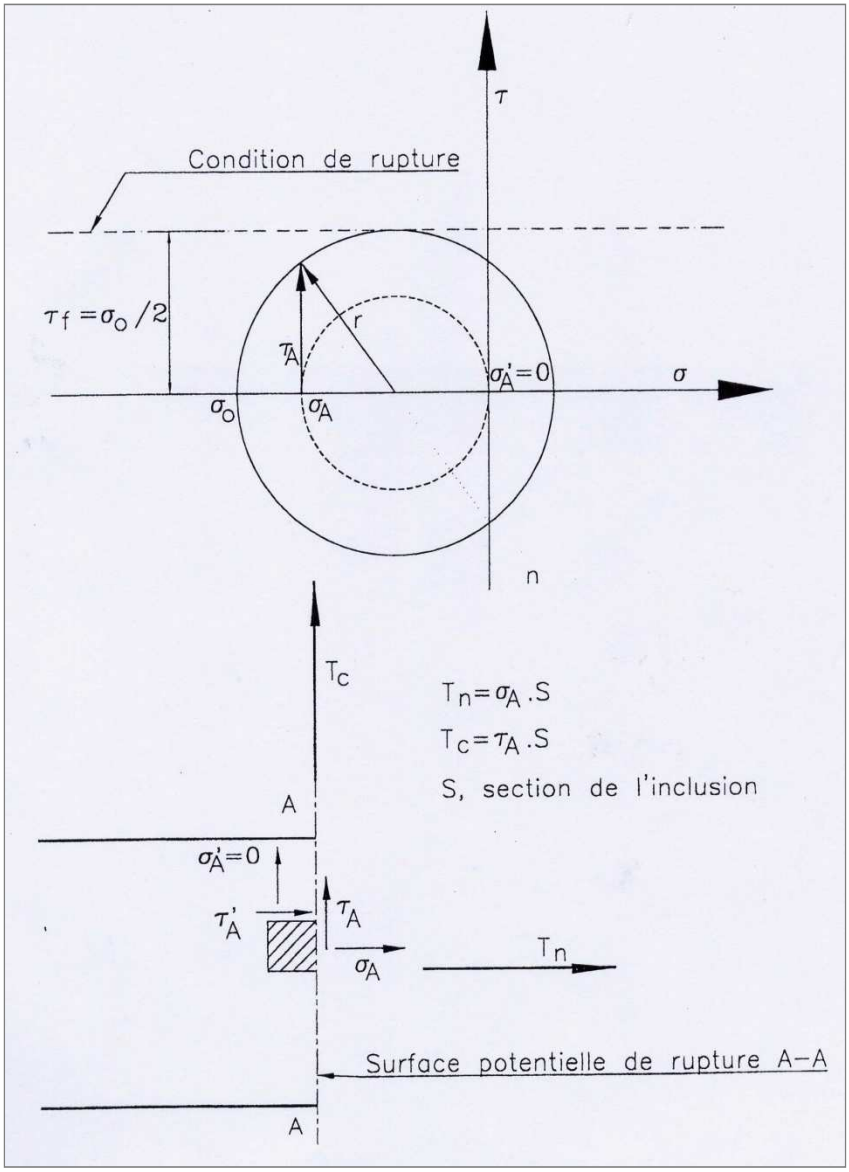


Figure 14: Résistance propre de l'inclusion

L'état de contrainte limite selon le critère de rupture de Tresca est :

$$r \le \tau_f = \sigma_o / 2$$

Avec :

σ_o, la contrainte de rupture à la traction pure

$$r^2 = \left(\frac{\sigma_A}{2} \right)^2 + {\tau_A}^2 \le \frac{{\sigma_0}^2}{4}$$

Exprimé en termes d'efforts T_c et T_n :

$$\frac{{T_n}^2}{4} + {T_c}^2 \le {R_c}^2 = \frac{{R_n}^2}{4}$$

Avec :

- R_c, la résistance en cisaillement de l'inclusion
- R_n, la résistance en traction de l'inclusion

$$\frac{{T_n}^2}{{R_n}^2} + \frac{{T_c}^2}{{R_c}^2} \le 1$$

L'équation définit la condition de rupture de l'inclusion au point O, point de moment nul et d'effort de cisaillement maximum. Dans un repère (T_n, T_c). Le domaine décrit par l'équation précédente est une ellipse de grand axe R_n et de petit axe R_c avec

$$R_n = 2R_c$$

6.4.4 *Interaction par frottement latéral*

L'effort normal, T_n, dans l'inclusion, au droit de la surface potentielle de rupture A-A doit être inférieur au frottement sol-inclusion maximum qui peut être mobilisé sur la longueur d'ancrage, L_a, de l'inclusion.

$$T_n \leq T_n l = \pi\, B\, L_a\, \tau_{max} = f_1 L_a$$

Avec :

- T_n, effort normal dans l'inclusion
- $T_n l$, effort normal limite d'interaction par frottement latéral
- B, diamètre de l'inclusion
- L_a, longueur d'ancrage de l'inclusion depuis la surface potentielle de rupture considérée
- τ_{max}, contrainte de cisaillement limite entre sol et l'inclusion
- f_1, effort d'arrachement limite pour un mètre de longueur d'inclusion, appelé aussi paramètre de frottement latéral.

τ_{max}, peut être déterminé par des essais d'arrachement, des corrélations avec p_l, la pression limite du sol ou à partir des caractéristiques géotechniques des sols et des conditions de mise en œuvre des inclusions.

Le critère d'interaction par frottement latéral est représenté sur la Figure 20 par une droite verticale d'abscisse $T_n l$.

6.4.5 *Interaction par pression de contact inclusion-sol*

La déformée de l'inclusion sollicitée par un déplacement relatif $2y_0$ entre les deux masses de sol situées de part et d'autre de la surface potentielle de rupture est représentée sur la Figure 22. Il est fait l'hypothèse que la pression est maximum au point O, point où le déplacement est maximum. Le problème est assimilable à celui de la sollicitation latérale d'un pieu dont la l'analyse a été décrite par Bourges et Franck (1979).

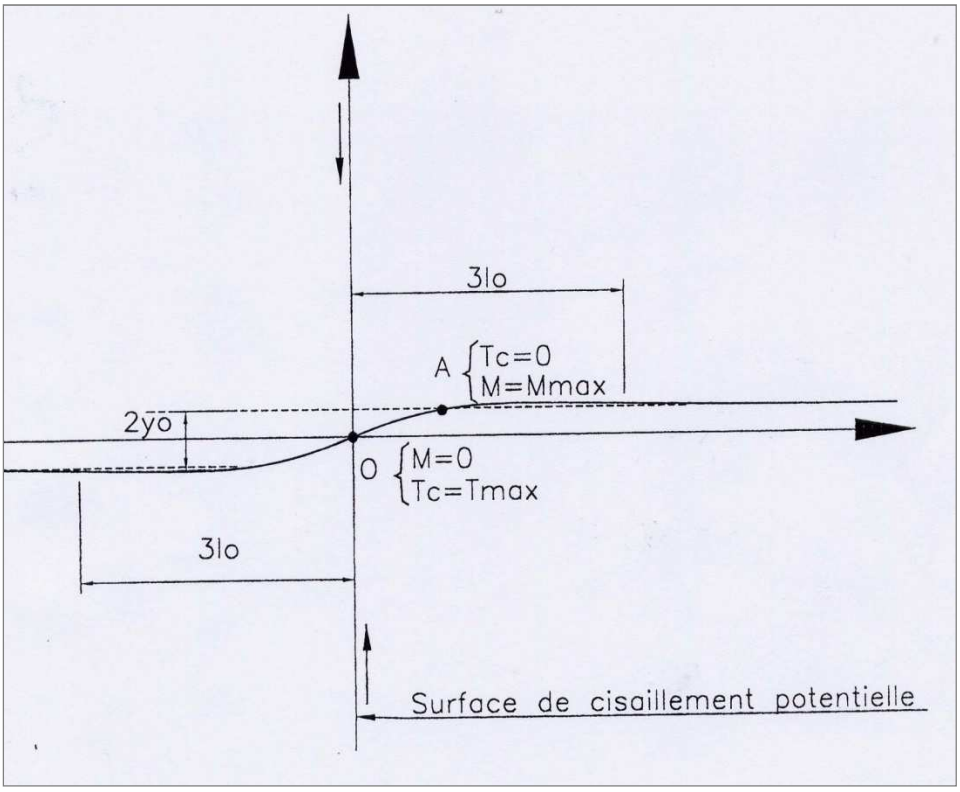


Figure 15 : Déformée de l'inclusion, déplacement relatif 2 y_0

La solution générale de l'équation différentielle qui exprime l'équilibre d'une poutre sur appuis élastiques fait intervenir la longueur de transfert, l_o, qui caractérise la rigidité relative sol-inclusion :

$$l_0 = \sqrt[4]{\frac{4EI}{K_S B}}$$

Avec :

- EI : la rigidité à la flexion de l'inclusion
- Ks : le module de réaction du sol
- B : la largeur de l'inclusion

Pour les cas généralement rencontrés dans la pratique, la longueur l_o est limitée à quelques dizaines de centimètres. Dans ce cas, le pieu est considéré comme infiniment long et par raison de symétrie, le moment est nul au point O, point d'interaction avec la surface potentielle de rupture. La solution analytique montre que :

- la pression de contact sol-inclusion, p, est maximale au point d'intersection O.
- le moment de flexion dans l'inclusion est maximal au point A situé à $\frac{\pi}{4}$ l_0 du point d'intersection O.

Dans l'expression des conditions limites d'interaction par pression de contact inclusion-sol, on veut éviter les conditions de rupture aux points O et A par plastification du sol au point O et plastification de l'inclusion au point A.

Les deux cas suivants peuvent se présenter :

Cas 1: la pression limite du sol, p_l, est atteinte en O avant la plastification de la barre en A. On montre alors que l'effort tranchant limite Tc_l, mobilisé en O vaut :

$$Tc_{l1} = \frac{B\, l_0\, p_l}{2}$$

Bien que l'effort tranchant continue d'augmenter avec la plastification progressive du sol le long de la barre, on limite l'effort tranchant à la valeur donnée précédemment pour rester dans un domaine de déformations admissibles. Sur le diagramme (T_n,T_c) de la Figure 20, cette condition limite correspond à une droite parallèle à l'axe T_n d'ordonnée $\frac{B\, l_0\, p_l}{2}$

Cas 2 : La plastification de la barre en A est atteinte avant celle du sol en O. Il se crée une rotule plastique en A mais le sol reste à l'état élastique en O. Dans ce cas, la valeur de l'effort tranchant limite Tc_{l2} est donnée par l'expression :

$$Tc_{l2} = 0.239\, B\, l_0\, p_l + 1.62\, \frac{M_{max}}{l_0}$$

Avec :
M_{max}, le moment de plastification de l'inclusion.

L'inclusion travaillant en flexion composée, M_{max} et T_n ne sont pas indépendants et la courbe limite de Tc_{l2} se présente sous la forme d'une courbe d'allure parabolique centrée sur l'axe T_c et de concavité tournée vers le bas telle qu'indiquée sur la Figure 20.

6.4.6 *Combinaison des différents critères*

L'enveloppe inférieure des différents critères décrits précédemment définit le domaine dans lequel doit être contenu l'effort résultant dans les inclusions T (T_n, T_c). Ce domaine est indiqué sur la Figure 20.

Pour connaître les valeurs de T_n et T_c à introduire dans les équations d'équilibre, on applique le principe du travail maximal pour un déplacement du sol τ tangent à la surface de rupture. On a :

$$\left(\vec{T} - \vec{T}^{*}\right).\vec{\delta} \geq 0$$

Avec :

$\vec{T}$, l'effort mobilisé à la rupture dans l'inclusion

$\vec{T}^{*}$, tout effort licite, c'est à dire qui satisfait aux différents critères.

6.5 Surfaces de rupture

6.5.1 *Surfaces circulaires*

Le programme dispose de deux méthodes pour la génération des surfaces circulaires et la recherche du cercle de facteur de sécurité minimum:

- La méthode de la boîte des centres
- La méthode des intervalles d'entrée et de sortie

La méthode de la boîte des centres est décrite sur la Figure 23. Dans cette méthode, une grille de centres de cercles de rupture est établie à partir de deux points de coordonnées (X_G, Y_G) et (X_D, Y_D), du nombre d'intervalles m selon l'axe x et du nombre d'intervalles n selon l'axe y.

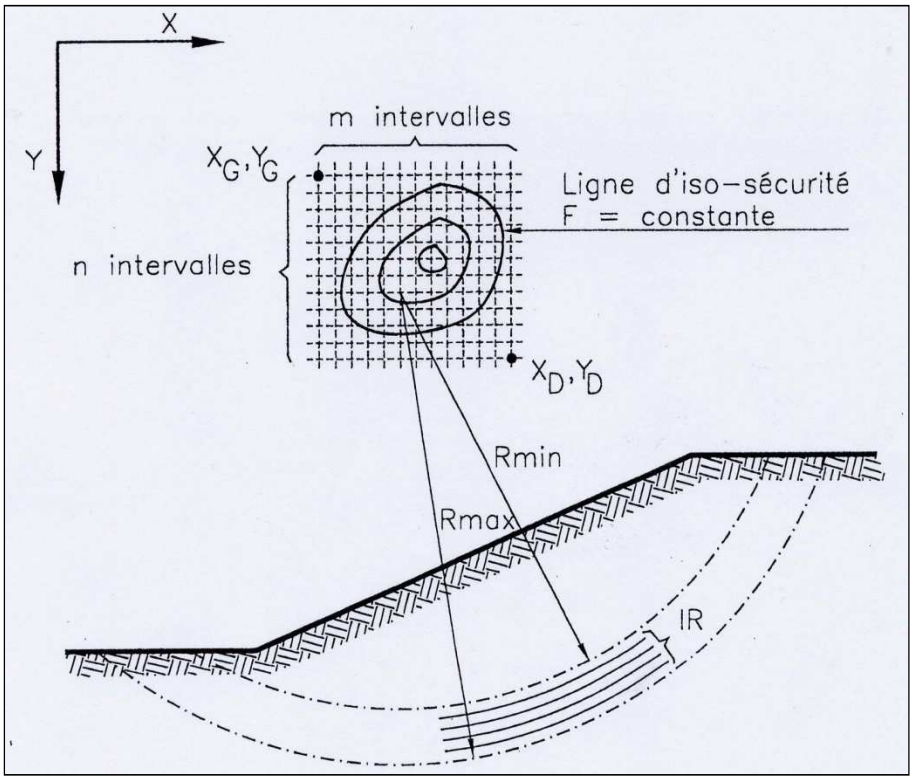


Figure 16 : Méthode des boîtes de centre.

En chaque point de la grille, L cercles de rayon R compris entre R min et R max sont analysés, seul le cercle donnant le facteur de sécurité minimum étant retenu.

A la fin de l'analyse, des lignes d'iso-facteur de sécurité sont établies à partir du facteur de sécurité retenu en chaque point et le facteur de sécurité minimum est identifié.

La méthode des intervalles d'entrée et de sortie est décrite sur la Figure 24. Elle consiste à définir un intervalle d'entrée en pied de talus et un intervalle de sortie en sommet de talus. L'intervalle d'entrée peut être délimité soit par les abscisses (X_G, X_D) soit par les ordonnées (Y_G,Y_D).

Sur l'intervalle d'entrée, n-1 points équidistants sont définis; à partir de chacun de ces points ainsi que des limites X_G et X_D ou Y_G et Y_D, m cercles sont générés à l'intérieur du fuseau des cercles géométriquement possibles, ces cercles ayant une densité de probabilité uniforme sur l'intervalle de sortie.

Sur l'ensemble des cercles analysés, les dix cercles donnant le facteur de sécurité le plus faible sont retenus; les coordonnées des centres et les rayons sont imprimés et les cercles sont dessinés, le cercle le plus critique étant identifié.

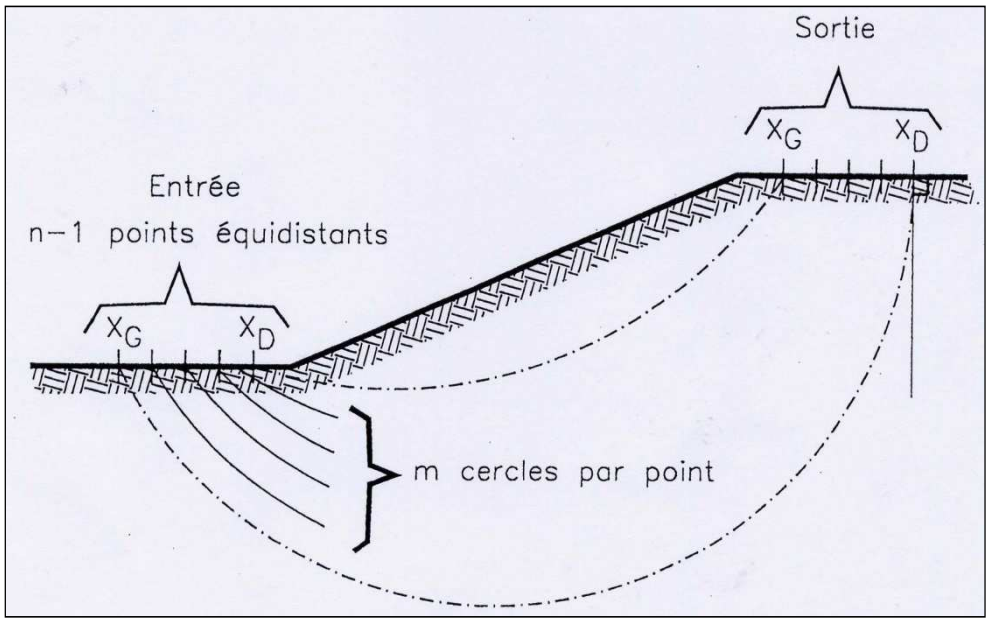


Figure 17: Méthodes des intervalles d'entrée et de sortie

6.5.2 *Surfaces non circulaires*

Dans l'analyse des surfaces non circulaires, on différencie la détermination du facteur de sécurité d'une surface dont la géométrie est fixée, du processus de recherche de la surface ayant un facteur de sécurité minimum.

6.5.3 *Surface quelconque fixée*

Dans le cas d'une surface unique (option « vérification d'une surface » du programme), la géométrie est entièrement fixée par les coordonnées des points d'extrémité à la surface et des segments de droite définis par une série de points de coordonnées (X, Y).

Une surface introduite de cette manière est analysée selon la méthode de Carter, même si elle est circulaire et le facteur de sécurité obtenu peut être légèrement différent de celui calculé par la méthode de Bishop simplifiée pour la même surface circulaire.

6.5.4 *Spirale logarithmique*

Dans cette méthode, une surface ayant une forme de spirale logarithmique est recherchée.

Le principe de la méthode est le même que celui de la méthode des intervalles pour les surfaces circulaires définie sur la Figure 24, seulement les surfaces étudiées ont la forme d'une spirale logarithmique.

6.5.5 *Méthode des boîtes*

La méthode des boîtes est décrite sur la Figure 25. Elle consiste à définir un certain nombre de boîtes par lesquelles les surfaces de rupture passent forcément. Entre deux boîtes adjacentes, la surface de rupture est rectiligne, les points à l'intérieur de chaque boîte étant générés de façon aléatoire.

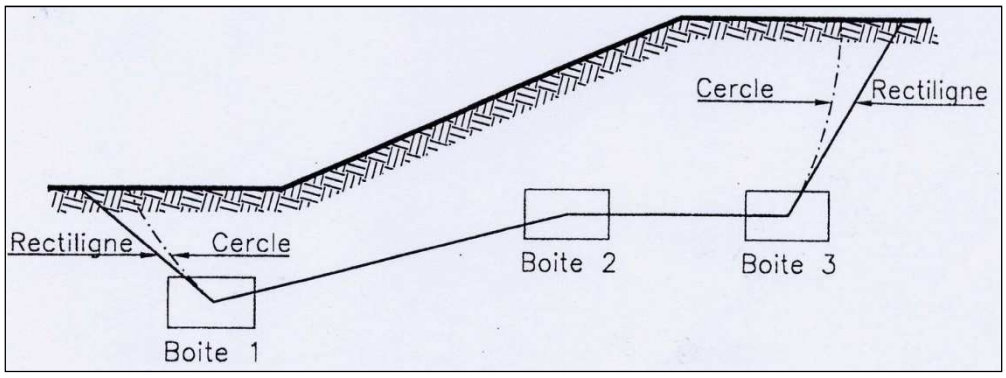


Figure 18: Surfaces non-circulaires, méthode des boîtes.

De part et d'autre des boîtes d'extrémité, les surfaces de rupture sont prolongées par des coins de poussée et de butée ou des cercles.

A la fin du processus d'analyse, les dix surfaces les plus critiques sont retenues avec leur facteur de sécurité. Elles sont représentées graphiquement et la surface critique est identifiée.

6.6 Prise en compte des sollicitations sismiques

Dans la prise en compte des séismes, il faut différencier les cas de surfaces circulaires analysées par la méthode de Bishop modifiée de ceux des surfaces quelconques analysées par la méthode de Carter.

6.6.1 *Méthode de Bishop modifiée*

Dans le cas d'analyses de surfaces circulaires par la méthode de Bishop modifiée, les recommandations de l'AFPS sont appliquées :

Le problème est ramené au cas habituel de forces dans un champ gravitaire vertical en faisant, tel qu'indiqué sur la Figure 26, subir à l'ensemble du profil, ouvrage et charges comprises, une rotation égale à θ_a dans le cas où les coefficients sismiques σ_H et $+\sigma_V$ sont appliqués et θ_b dans le cas où σ_H et $-\sigma_V$ sont appliqués, avec :

$$\theta_a = arctg \frac{\sigma_H}{1+\sigma_v}$$

$$\theta_b = arctg \frac{\sigma_H}{1-\sigma_v}$$

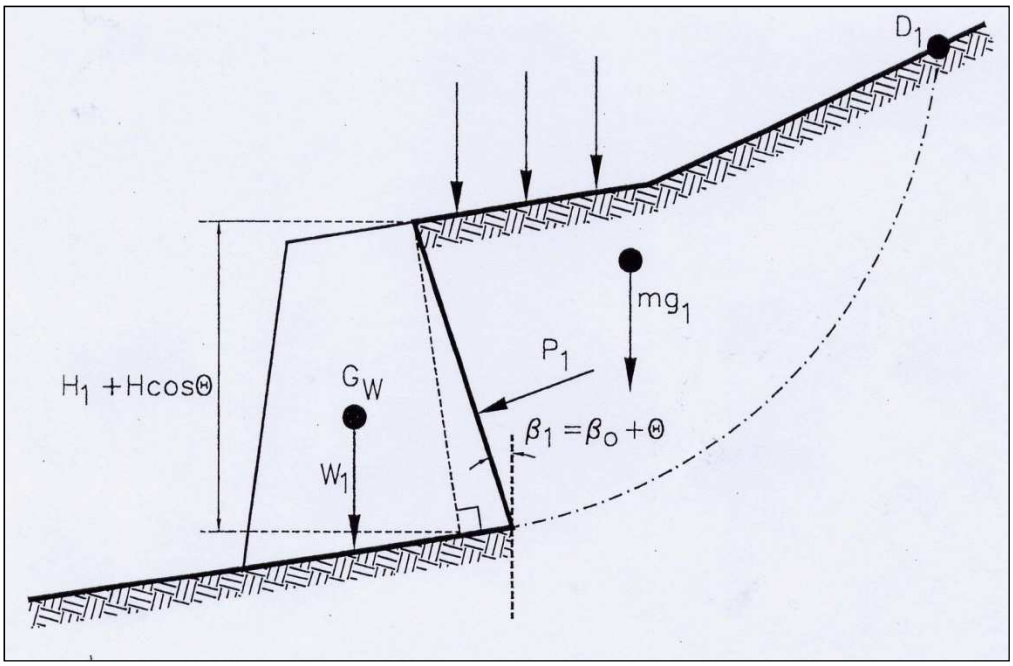


Figure 19 : Méthode de Bishop simplifiée. Prise en compte de l'effet des séismes par rotation de l'ensemble (selon recommandation AFPS).

L'intensité du champ de pesanteur étant remplacée par l'intensité fictive

$$g_a = \frac{1+\sigma_v}{\cos\theta_a}\, g$$

$$g_b = \frac{1-\sigma_v}{\cos\theta_b}\, g$$

Avec :

- σ_H, coefficient sismique horizontal
- σ_v, coefficient sismique vertical
- g, accélération de la pesanteur

Dans le cas où la rotation du système entraîne un surplomb du talus (cas des parois clouées avec un parement raide), cette approche n'est pas applicable. Il n'est pas appliqué de rotations et les efforts sismiques sont alors introduits comme des forces verticales et horizontales appliquées au centre de gravité. Ces forces sont prises en compte dans l'équation d'équilibre global des moments et elles sont ajoutées dans l'équation du facteur de sécurité de la méthode de Bishop modifiée.

6.6.2 *Méthode de Carter*

Dans le cas des surfaces de rupture de forme quelconque analysées par la méthode de Carter, il n'est pas procédé à une rotation du profil. Les équations d'équilibre sont modifiées pour inclure les forces massiques verticales et horizontales dues aux séismes.

7. Calculs sur les clous

7.1 Clous - Efforts au parement

Le logiciel GEOSTAB permet désormais de récupérer les efforts nécessaires au dimensionnement du parement d'une paroi clouée.
Les recommandations CLOUTERRE 1991 préconisent, pour le dimensionnement du parement :

« Par souci de simplification, on admet généralement que le torseur des efforts à la liaison clou-parement se réduit à un effort axial de traction T_0 et que la pression des terres p est uniforme.

Deux approches sont possibles : soit calculer les tractions T_0 à partir des efforts maximaux mobilisables dans les clous pour en déduire p, soit calculer p comme une poussée locale des terres dans un mécanisme de rupture approprié pour en déduire T_0. En l'absence actuelle de données fiables sur les répartitions de la pression des terres sur le parement, il est recommandé d'utiliser la première approche, décrite ci-après. La valeur de T_0 se déduit de celle de l'effort maximum de traction T_{max}, mobilisable sur la surface de rupture potentielle la plus critique en considérant une valeur unique pour le rapport T_0/T_{max}, dans le mur. »

Préalablement, le logiciel calcule les efforts dans les clous pour toutes les surfaces de rupture.

$$F_{clou} = Max(L_u * \frac{q_s}{\Gamma_{qs}} * \pi * \phi ; \frac{F_{arm}}{\Gamma_{acier}})$$

Avec :

- L_u : longueur utile du clou, celle-ci correspond à la distance entre l'intersection clou / surface de rupture et l'extrémité du clou,
- q_s : valeur du frottement latéral entre le sol et le clou : si plusieurs sols sont traversés par le clou, l'effort sera calculé pour chaque section,
- Γ_{qs} : facteur de sécurité pris pour le frottement latéral du sol,
- Ø : diamètre de forage du clou,
- F_{arm} : résistance structurale du clou,
- Γ_{acier} : facteur de sécurité sur la résistance structurale des clous.

Pour les efforts au parement, le programme calcule 4 types d'efforts :

- Tmax : effort maximal strictement nécessaire à l'intersection clou / surface de rupture sur l'ensemble des surfaces calculées pour obtenir le facteur de sécurité visé (stabilité du site).
  - Pour la $i_{ème}$ surface, l'effort T_{0i} dans le clou fait varier le facteur de sécurité de $Fs_{0i\ (sans\ inclusions)}$ à $Fs_{ri\ (avec\ inclusions)}$,
  - Recherche par itérations de T_i strictement nécessaire pour que le facteur de sécurité passe de Fs_{0i} à $Fs_{visé}$, Itération de ce processus sur l'ensemble des surfaces de rupture,
  - Tmax = max (Ti).

- L'effort T_0, correspondant à l'effort au parement issu du calcul de stabilité du site. Il correspond à l'effort T_{max} minoré par la déduction des forces de frottement latéral entre le parement et la surface de rupture calculée.

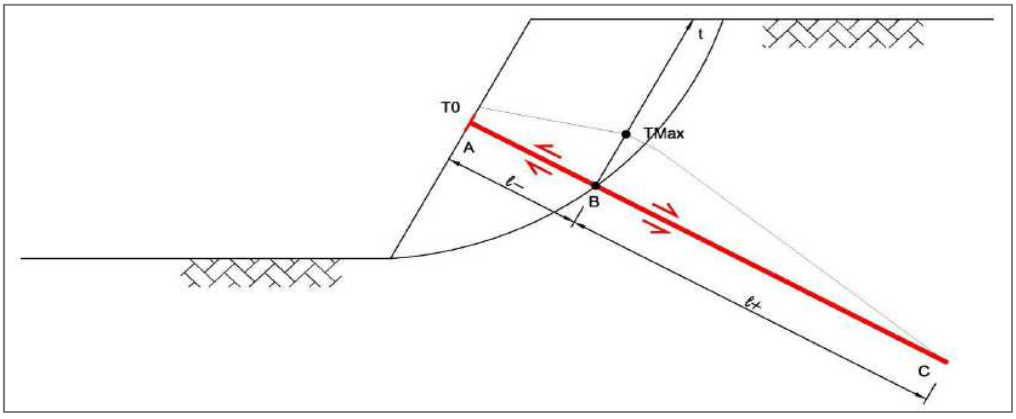


Figure 20 : Effort T_0

- L'effort T_1, strictement nécessaire dans l'axe du clou pour que le poids du parement soit repris par frottement sur le sol (condition de non-glissement du parement)

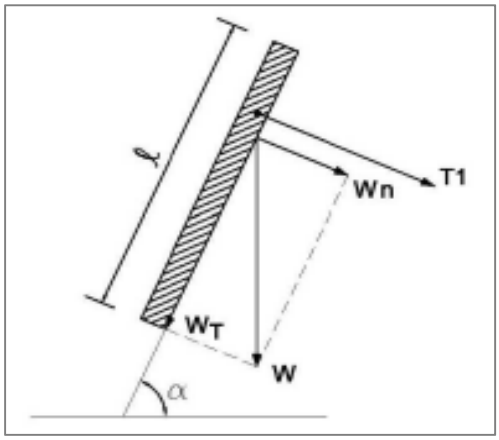


Figure 21 : Effort T_1

- L'effort T_2, strictement nécessaire pour que le parement puisse reprendre les efforts de poussée. Ainsi, GEOSTAB calcule l'effort de poussée par la méthode de CULMANN, comme le fait GEOMUR, le majore pour tenir compte d'un état intermédiaire entre la poussée active et celle au repos, puis il en déduit le diagramme de contraintes à l'arrière de la paroi. Afin de tenir compte de la présence des clous, il est possible de redéfinir ce diagramme selon une forme à définir dans le logiciel (rectangulaire, triangulaire ou trapézoïdale), comme cela est fait pour les tranchées blindées (cf. Philipponnat fig. 9.37).

  - La poussée exercée sur l'écran s'écrit :

$$T_2 = P_A \left[\frac{K_0}{K_A} + \frac{\delta}{\delta_A}\left(1 - \frac{K_0}{K_A}\right)\right]$$

    Avec δ le déplacement relatif mesuré lors de la réalisation de parois clouées et δ_A le déplacement relatif de l'écran nécessaire pour atteindre l'état actif.
    D'après les Recommandations CLOUTERRE 1991 (Tableau 13.3.1.1) et l'Annexe C3 de la norme NF 1997-1-EC7 (Tableau C1) : $\delta/\delta_A = 0{,}4$. Ainsi :

$$T_2 = 1{,}3\ P_A$$

  - En l'absence de tout déconfinement, la poussée exercée sur l'écran serait celle au repos et dans ce cas le rapport K_0/K_a est compris entre 1,4 et 1,6 (pour des valeurs courantes de φ (25° à 40°)). Soit en moyenne: $T_2 = P_A \cdot (K_0 / K_a) = 1{,}5\ P_A$

  - Si le déconfinement est tel que l'état actif peut être atteint, alors la poussée exercée sur l'écran serait : $T_2 = P_A$

  La poussée sur l'écran est donc comprise entre 1 et 1,5 P_A. Il est proposé de retenir $T_2 = 1{,}3\ P_A$. Cependant, si toute déformation était bloquée, alors la valeur proposée $T_2 = 1{,}3P_A$ sous-estime la poussée appliquée sur le parement et la valeur à retenir pour T_2 est $T_2 = 1{,}5\ P_A$.

L'effort maximum parmi T_0, T_1 et T_2 est l'effort ponctuel en tête à retenir pour le calcul ultérieur du parement de la paroi.

7.2 Calcul des longueurs optimisées de clous

Le programme permet le calcul de la longueur strictement nécessaire pour obtenir le facteur de sécurité visé, et ce, en accord avec les règles pratiques du terrain : un clou ne peut pas avoir une longueur supérieure à celui posé à la passe précédente. Celle-ci est calculée par calculs itératifs pour chaque lit de clous.

Les longueurs de clous envisageables par profondeur sont calculées. La longueur minimum pour assurer la stabilité avec le facteur de sécurité visé est retenue et le calcul est poursuivi à la profondeur suivante avec notamment la contrainte de calcul suivante ;

$$Li \geq Li+1$$

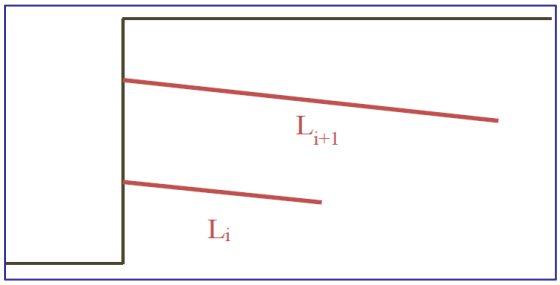


Figure 22 : Optimisation de la longueur des clous

8. Vérification de Kranz

8.1 Généralités

La méthode de Kranz est une méthode de vérification de la stabilité du massif d'ancrage d'un écran de soutènement, elle permet de vérifier que la réaction d'ancrage s'exerce suffisamment loin pour ne pas prendre appui sur l'écran. Les ancrages sont alors pris en compte suivant la position de leurs points d'ancrage effectif par rapport aux limites du bloc étudié.
Cette méthode est désormais présentée dans l'annexe nationale NF P 94-282 (Annexe G) à l'EUROCODE 7 comme la procédure normalisée.

8.2 Mécanismes de rupture

Un écran de soutènement retenu par des ancrages peut être affecté par différents mécanismes de rupture (figure 9) qui peuvent être :

- un glissement généralisé, notamment dans le cas de sols de caractéristiques médiocres,
- une rupture du scellement, si la traction transmise au sol est supérieure à sa résistance. Le massif se renverse mais la courbe de rupture ne peut pas se former, c'est le tirant qui "lâche",
- un renversement du massif, lorsque l'effort de traction du tirant déstabilise le massif. La rupture se produit suivant une ligne de rupture bC en arc de cercle et selon les prismes de poussée en arrière de l'ancrage et de butée en avant de l'écran.

La méthode de Kranz est une des méthodes de vérification de la stabilité au renversement du massif des terres.

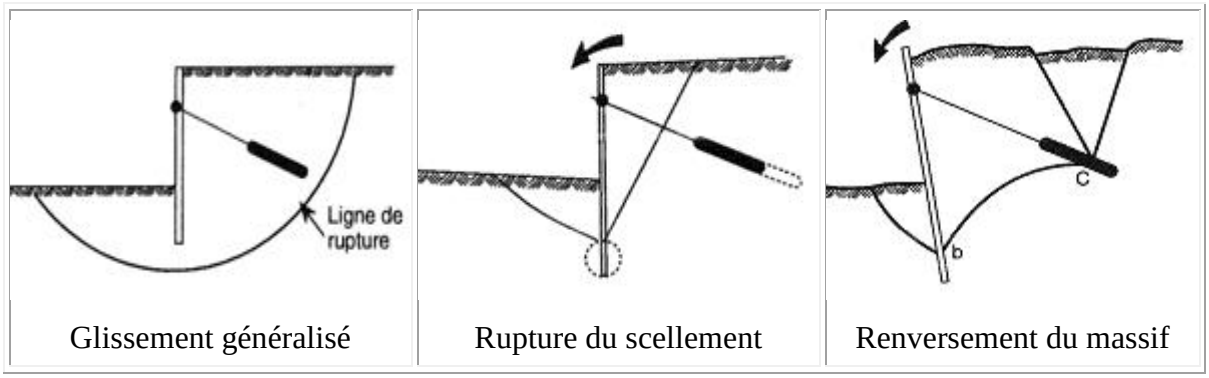


Figure 23: Modes de rupture

8.3 Définition du facteur de sécurité de Kranz

La vérification de la stabilité par la méthode de Kranz s'effectue à l'état limite ultime, c'est-à-dire, à la rupture. Elle s'écrit :

$$\mathbf{R' \geq F_S \cdot R}$$

Avec :

- R : réaction appliquée par l'ancrage
- F_S : coefficient global de sécurité (fixé au minimum à 1.5 par les recommandations Tirants d'Ancrages 95 et à 1 en utilisant l'approche 2 de l'Eurocode 7)
- R' : effort maximal compatible avec la sécurité du massif

A la différence des méthodes de Bishop ou Fellenius où le facteur de sécurité représente le rapport de la résistance du sol sur la résistance mobilisée, Kranz définit son facteur de sécurité sur des actions. C'est le rapport de la force d'ancrage maximum R' qui provoque l'instabilité sur la force d'ancrage réellement appliquée.

8.4 Equations de base

8.4.1 *Géométrie*

Le massif de sol *MCEF* est délimité comme l'indique la figure suivante :

- à l'avant par un plan MF tangent au soutènement passant par un point M situé au-dessus du point B d'effort tranchant nul ;

- à l'arrière par un plan vertical EC dit plan d'ancrage fictif passant par le point C, point d'ancrage fictif (ici le centre de la partie scellée) ;
- en bas, par la ligne de glissement *BC*.

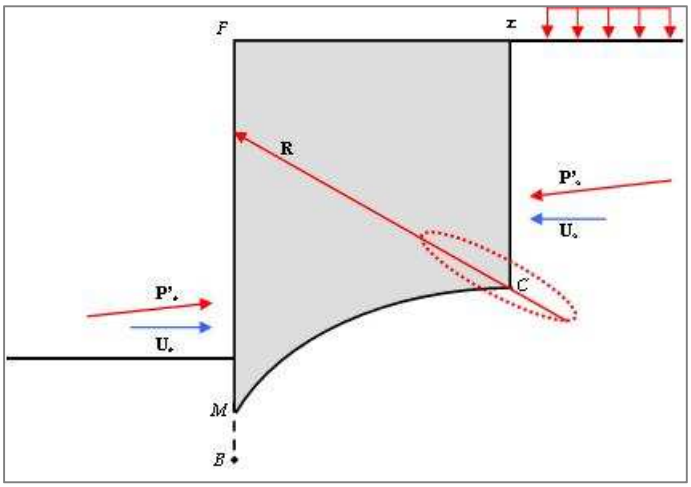


Figure 24: Equilibre du massif

Le point C est le point d'application de la force d'ancrage. Il est appelé "point d'ancrage fictif". Il correspond généralement au centre de la partie scellée mais peut être situé à une distance de l'extrémité égale à l'espacement entre deux tirants successifs de la même nappe.

La surface de glissement la plus défavorable entre le point C et un point M quelconque du segment *FB* peut être déterminée par des segments de droite ou des successions d'arcs de spirale logarithmique.

Les coefficients partiels appliqués à l'Eurocode 7 (Approche 2) pour la méthode de Kranz sont donnés en annexe C.

Selon l'annexe G de la norme NF P 94-282, l'effort maximal compatible avec la sécurité du massif est minimum lorsque la surface de rupture est constitué d'arcs de spirale logarithmique non de segments de droite. La thèse de F. Masrouri a montré que la ligne de rupture de la méthode de Kranz est plus proche d'une ligne droite que d'une spirale logarithmique, les moyens informatiques actuels permettant de traiter rapidement un grand nombre de surfaces de type spirales logarithmiques.
Pour établir cette surface critique, une méthode de calcul à la rupture est retenue, avec des arcs de spirales logarithmiques à concavité dirigée vers le haut. Selon cette méthode, l'effort maximal compatible avec la sécurité du massif est obtenu en considérant les forces conduisant à la rupture du bloc.

8.4.2 *Forces en présence*

L'ensemble des efforts en présence est présenté sur la figure suivante :

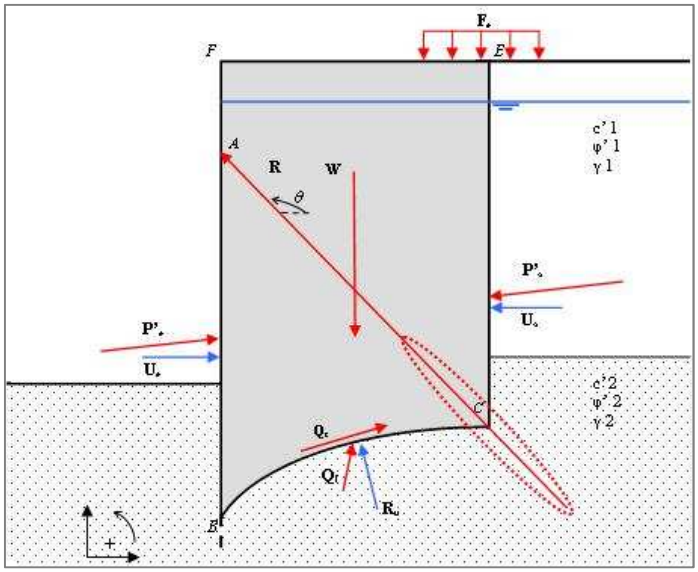


Figure 25: Efforts sur le massif

Avec :

- W : poids du massif ;
- P'_e : réaction de l'écran, égale et opposée à la poussée des sols et des surcharges sur l'écran ;
- P'_a : poussée, surcharge comprise, sur le plan d'ancrage fictif ***EC ;***
- R : réaction d'ancrage ;
- F_e : forces extérieures ;
- Q_c : réaction de cohésion du terrain sous-jacent sur la surface de rupture ***BC ;***
- Q_f : réaction de frottement du terrain sous-jacent ;
- U_a : résultante des pressions d'eau ;
- U_e : force opposée à la résultante des pressions d'eau ;
- R_u : résultante des pressions d'eau sur la surface de rupture.

Remarques :
Selon la norme NF P 94-282, la butée qui s'applique sur le segment BF n'est pas prise en compte.

Dans le cas hydrostatique, l'équilibre peut être étudié en ne considérant que le poids volumique total pour les parties hors nappe et le poids volumique déjaugé pour les parties sous nappe, en ignorant les forces dues à l'eau U_a, U_e et R_u.

8.4.3 *Ecran avec plusieurs lits d'ancrage*

Dans le cas d'un écran avec plusieurs lits de tirants d'ancrage, l'équilibre d'un bloc de chaque lit d'ancrages est à étudier en tenant compte :

- des forces d'ancrages appliquées à l'intérieur du bloc considéré,
- des forces d'ancrages extérieures au bloc qui ont une influence sur les contraintes appliquées au bloc (la force d'ancrage P_e diffusée dans le prisme de poussée du sol sur la figure suivante).

Les autres forces d'ancrages, et notamment les efforts tels que présentés sur la figure ci-dessous n'ont pas lieu d'être prises en compte.

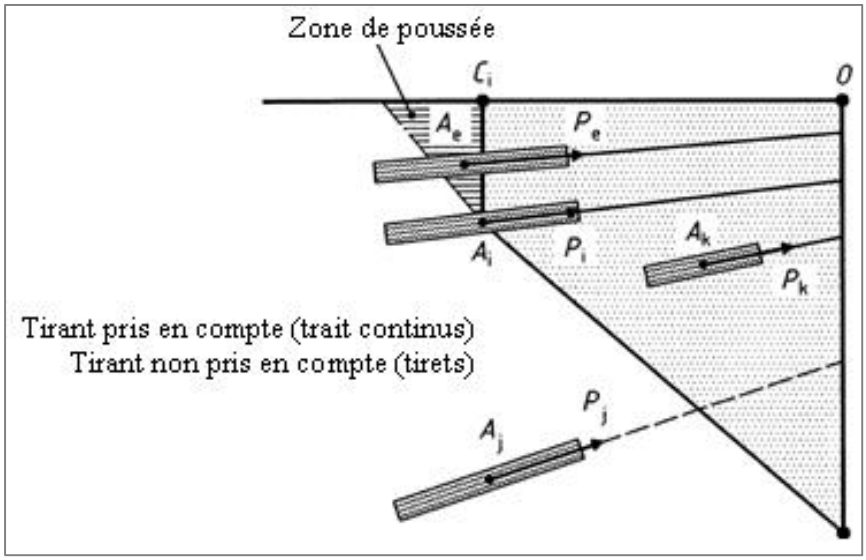


Figure 26 : Lits d'ancrages multiples

BIBLIOGRAPHIE

- AFNOR NF EN 1997-1 et NF EN 1997-1/NA « Eurocode 7 – Calcul géotechnique – Partie 1 : Règles générales », 2005 et son annexe nationale.
- AFNOR NF P 94-270 Ouvrages de soutènement - Remblais renforcés et massifs en sol cloué, 2009.
- AFNOR NF P 94-282 Ouvrages de soutènement – Ecrans, Réf. NF P94-282, Mars 2009.
- AFPS "Recommandations AFPS 90 pour la rédaction de règles relatives aux ouvrages et installations à réaliser dans les régions sujettes aux séismes", Tome 1 et 2.
- Bishop A.W. (1955). "The use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes", Geotechnique, Vol. 5, No. 1, March, pp. 7-17.
- Bishop A.W. and Morgenstern N. (1960). "Stability Coefficients for Earth Slopes" Geotechnique, Vol. 10, No.4, Dec., pp. 129-150.
- Blondeau F., Christiansen M., Guilloux A., Schlosser F., "Talren Méthode de calcul des ouvrages en terre renforcée", Compte rendu du colloque international sur le renforcement en place des sols, Paris 9-11 octobre 1984.
- Bridle R.J., "Soil nailing- Analysis and design", Ground Engineering, sept. 1989.
- Bridle R.J., "Soil nailing- Discussion", Ground Engineering, July-August 1990.
- Carter, R. K. (1971). "Computer Oriented Slope Stability Analysis by Method of Slices", MSCE Thesis. Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Cartier G., "La stabilisation des pentes instables par clouage", Bulletin du LCPC n° 141, jan-fév. 1986.
- Comité Français de la Mécanique des Sols et des Travaux de Fondations, Recommandations Tirants d'Ancrage 95, Edition Eyrolles, 1995.
- Comité Français de Mécanique des Sols, "Recommandations concernant la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des tirants d'ouvrage.", Eyrolles 1995.
- Delmas P. et al., "Le dimensionnement des ouvrages renforcés par géotextile: programme CARTAGE", Bulletin du LCPC n°142, mars-avril 1986.
- Delmas P. et al., "Une nouvelle méthode de dimensionnement du clouage des pentes : programme PROSPER", Bulletin du LCPC n° 141, jan-fév. 1986
- EPFL (1996) "Etude du comportement d'une paroi expérimentale renforcée par clouage- Analyse du comportement mécanique de l'ouvrage. Comparaison des programmes de calcul". Rapport RX47, Institut des sols, roches et fondations, Laboratoire de Mécanique des Roches.
- FAURE R.M., Analyse des contraintes dans un talus par la méthode des perturbations, Revue Française de Géotechnique n°33, pp49-59, 1985.
- FAURE R.M., HORNYCH P., Journées françaises de géotechnique - Stabilité d'un bloc dans un massif surconsolidé, Décembre 1988.
- Faure R.M., Mouroux P., Rajot J.P., "Prise en compte des actions sismiques dans un programme de stabilité des pentes", Premier colloque National de génie parasismique, St Rémy les Chevreuse, 29-31 janvier 1986.
- FAVRE M., VERMOOTE E., FUENTES D. : « Réflexions et propositions pour le calcul optimisé des parois clouées » Conférence internationale sur les risques de glissement de terrain, accepté pour publication à l'ICLR 2013, 14-16 mars 2013, Tunisie.
- FELLENIUS W., Erdstatische Berechnungen mit Reibung und Kohäsion (Adhäsion) und unter Annahme kreiszylindrischer Gleitflächen, Ernst & Sohn, Berlin, 1927.
- Fellenius, W. (1927). Erdstatische Berichnungen mit Reibung und Kohäsion, " Wilhelm Ernst and Sohn KG, Berlin.
- FILLIAT G., La pratique des sols et des fondations, Edition du Moniteur, 1392 pages, 1981.

- Gigan J.P., Delmas P., " Mobilisation des efforts dans les ouvrages cloués : Etudes comparative de différentes méthodes de calcul", Bulletin du LCPC n°147, jan-fév 1987.
- Gillon A., "Calculs de stabilité de pentes- Dimensionnements de tunnels", Mémoire de fin d'études, IST Pierre et Marie Curie, 1997.
- Gudehus G. "Clouage des sols : règles de dimensionnement et leur vérification expérimentale", Revue française de Géotechnique n°19.
- Jewell R.A., Pedley M.J., "Soil nailing design : The role of bending stiffness", Ground Engineering, March 1990.
- Kovarik J.B. (1990), "Stabilité et dimensionnement à la rupture des ouvrages de soutènement en sol renforcé. Comparaison des logiciels STARS et TALREN". Projet en fin d'études, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- Marche R., Favre M. (1999), "Dimensionnement et fluage à moyen terme d'un mur cloué de grande hauteur", Publication 138, Frühjahrstagung, 23 April 1999, Bern.
- MASROURI F. & KASTNER R., Essais sur modèle de rideaux de soutènement ; confrontation à diverses méthodes de calcul, Revue française de géotechnique n°55 pp17-33, 1990.
- MASROURI F., Comportement des rideaux de soutènement semi-flexibles – Etude théorique et expérimentale, INSA Lyon, 1986.
- Nonveiller, E. (1965). "The Stability Analysis of Slopes with a Slip Surface of General Shape," Proceedings, of the Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Montreal, Vol. 2, pp. 522-525.
- PETAL-LCPC, Programme d'études de la stabilité des talus en rupture circulaire et non-circulaire, Laboratoire des Ponts et Chaussées, France, 1984.
- PHILIPPONNAT G., HUBERT B., « Fondations et Ouvrages en terre », 1997 – 4ème édition – Editions Eyrolles.
- Projet National CLOUTERRE II – Opération de génie civil et urbain, Additif 2002 aux recommandations CLOUTERRE 1991, pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2002.
- Projet National CLOUTERRE, Recommandations CLOUTERRE 1991 pour la conception, le calcul, l'exécution et le contrôle des soutènements réalisés par clouage des sols, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 1991.
- Raulin P., Rougues G., Toubol A., "Calcul de la stabilité des pentes en rupture non circulaire", Rapport de recherche des LPC N° 36-1974.
- Seed, H..B. and Sultan, H.A. (1967). "Stability Analysis for a Sloping Core Embankment", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM4, July, pp. 69-83.
- SETRA (1998). "Les ouvrages de soutènement – Guide de conception générale", Décembre 1998.
- Sève G., "Stabilité des ouvrages géotechniques : données expérimentales et méthodes d'analyse", Thèse ENPC, 16 septembre 1998.
- Sève G., Pouget P. "Guide Technique : stabilisation des glissements de terrain", LCPC 1998.
- SMOLTCZYK U., Geotechnical Engineering Handbook 2: Procedures, Ernst & Sohn, Berlin, p 213.
- TEDENAT P., Leçons élémentaires de mathématiques - Deuxième partie, Duperat, pp64-76, 1801.
- Whitman, R. V. and Baily, W. A. (1967). "Use of Computers for Slope Stability Analysis, " Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM4, July, 475-498.
- Wright S.G., Kulhawy F.H. and Duncan J.M., (1973), "Accuracy of Equilibrium Slope Stability Analysis", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 99, No. SM10, Oct., pp. 783-791.

ANNEXE A: CARACTERISTIQUES DE CLOUS ET EPINGLES COURAMMENT UTILISES

1. Armatures Haute Adhérence

Il s'agit de barres à haute adhérence en acier dont la limite élastique est de 500 MPa.

	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
Φ (mm)	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
16	100.5	56.5	25.1	-
20	157.1	100.5	56.5	6.3
25	245.4	173.2	113.5	31.8
28	307.9	226.2	157.1	56.5
32	402.1	307.9	226.2	100.5
40	628.3	508.9	402.1	226.2
50	981.7	831.0	692.7	454.0

Tableau de Traction Elastique (kN)

	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
Φ (mm)	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
16	0,676	0,214	0,042	-
20	1,649	0,676	0,214	0,003
25	4,027	2,005	0,861	0,068
28	6,336	3,420	1,649	0,214
32	10,809	6,336	3,420	0,676
40	26,389	17,314	10,809	3,420
50	64,427	46,155	32,076	13,775

Tableau de EI (kN.m²)

	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
Φ (mm)	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
16	0,201	0,085	0,025	-
20	0,393	0,201	0,085	0,003
25	0,767	0,455	0,241	0,036
28	1,078	0,679	0,393	0,085
32	1,608	1,078	0,679	0,201
40	3,142	2,290	1,608	0,679
50	6,136	4,778	3,637	1,929

Tableau des Moments Elastiques (kN.m)

2. Clous auto-foreur

Φ (mm)	Φ (mm)	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
Externe	Interne	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
30	16	180,0	105,0	41,9	-
30	11	260,0	171,0	96,7	-
40	16	525,0	393,4	276,8	88,7
73	53	970,0	716,3	477,6	44,9
103	78	1570,0	1260,7	964,0	408,3

Tableau de Traction Elastique (kN)

Φ (mm)	Φ (mm)	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
Externe	Interne	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
30	16	4,967	2,311	0,725	-
30	11	4,706	2,353	0,980	-
40	16	18,854	11,698	6,716	1,368
73	53	164,754	113,078	70,001	5,667
103	78	665,863	508,656	369,846	141,505

Tableau de EI (kNm²)

Φ (mm)	Φ (mm)	Epaisseur sacrifiée à la corrosion			
Externe	Interne	0 mm	2 mm	4 mm	8 mm
30	16	0,745	0,390	0,139	-
30	11	0,957	0,552	0,270	-
40	16	2,751	1,884	1,203	0,310
73	53	11,247	8,016	5,155	0,450
103	78	26,396	20,690	15,437	6,220

Tableau des Moments Elastiques (kN.m)

3. Corrosion

- Selon CLOUTERRE

L'épaisseur sacrifié à la corrosion à l'extérieur des armatures est déterminée par le tableau suivant, tiré de CLOUTERRE 91.

Sol	**Ouvrage provisoire ≤ 18 mois**	**Ouvrage temporaire 1,5 à 30 ans**	**Ouvrage permanent 30 à 100 ans**
Peu corrosif	0 mm	2 mm	4 mm
Moyennement corrosif	0 mm	4 mm	8 mm
Corrosif	2 mm	8 mm	gaine plastique
Fortement corrosif	gaine plastique	gaine plastique	gaine plastique

Pour connaître de degré de corrosion du sol, il est recommandé de se reporter aux recommandations CLOUTERRE - Chapitre 6 - § 3.3.

- Selon NF P 94-270

La valeur de calcul de la traction élastique $R_{t;d}$ à rentrer dans GEOSTAB est donnée pour les clous par la relation :

$$R_{t;d} = \min (R_{t;dy} ; R_{t;dr}) \qquad \text{(NF P 94-270 §F.2.1.1(8))}$$

Avec :

- $R_{t;dy} = (1-\gamma_y \cdot \Delta S / S_0) \cdot (S_0 \cdot f_y / \gamma_{M0})$ (NF P 94-270 §F.2.1.1(5))
- $R_{t;dr} = (1-\gamma_r \cdot K\Delta S / S_0) \cdot (S_0 \cdot f_r / \gamma_{M2})$ (NF P 94-270 §F.2.1.1(6))

- $\gamma_{M0} = 1.0$ et $\gamma_{M2} = 1.25$ (NF P 94-270 §F.2.1.2)

Le calcul de $R_{t;dy}$ et $R_{t;dr}$ se fait différemment selon que l'on considère que les clous sont à l'abri ou non d'une protection contre la corrosion.

- Clous à l'abri d'une protection

La norme NF P 94-270 §F.2.3.3 impose les conditions suivantes :

- *« Une gaine imperméable doit être mise en place en complément au coulis de scellement autour des clous en acier ordinaire lorsqu'ils sont installés dans un terrain présentant une force corrosive élevée si la catégorie de durée d'utilisation est supérieure à 2, et dans tous les cas si les conditions de sol sont hétérogènes »*

  « L'espace annulaire entre la gaine et le clou doit être rempli d'un coulis de ciment ou de tout autre produit de scellement non agressif vis-à-vis de l'acier. »

  « Pour que le système soit efficace il est nécessaire que la gaine soit parfaitement étanche, donc continue jusqu'au parement, et obturée à la base. »

  « La manutention et la pose de clous protégés par des gaines doivent être réalisées avec soin de manière à éviter tout endommagement des gaines préjudiciable à la corrosion des clous. »

- *« Dans tous les cas où les clous seraient constitués d'acier à haute limite élastique (fy > 500 MPa), les dispositifs de protection des tirants d'ancrage précontraints doivent être appliqués (voir la norme NF EN 1537 et les recommandations nationales, dites T.A 95). »,*

- *« Pour les clous satisfaisant aux conditions énoncées ci-dessus, les coefficients $\rho_{deg;y}$ et $\rho_{deg;r}$ peuvent être pris égaux à 1.0. »*, ce qui revient à :

$$R_{t;dy} = (S_0 \cdot f_y / \gamma_{M0})$$
$$R_{t;dr} = (S_0 \cdot f_r / \gamma_{M2})$$

- Clous sans protection contre la corrosion

La norme NF P 94-270 §F.2.3.2 donne les valeurs de K, ΔS, γ_y ; γ_r à utiliser à défaut d'une étude spécifique.
La diminution de la section d'acier ΔS se calcule par la relation :

$$\Delta S = (A \cdot t^n) \cdot \pi \cdot Ø$$

La norme NF P 94-270 §F.2.3.2 donne, des valeurs par défaut K = 2.5, n = 0.65 et A fonction de la force corrosive du sol :

Force corrosive	Faible	Moyenne	Elevée A (1)
A (µm)	25	37.5	50
(1) *Pour des catégories d'utilisation ≤ 2.*			

La norme donne également $\gamma_y = 1.5$ et $\gamma_r = 1.8$.

ANNEXE B : MODULE DE REACTION DU SOL

L'utilisation du multicritère pour les clous et épingles nécessite la connaissance de la pression limite Pl et du module de réaction du sol K_s.

1) Au sens du Fascicule 62 – Titre V et NF P 94-262

Le module de réaction surfacique peut se déterminer selon l'Annexe C5 - § 3 et 4 du Fascicule 62 – Titre V (ou par l'annexe I.1.3 de la norme NF P 94-262) par la relation :

$$Ks = \frac{12 \times Em}{\frac{4}{3} \times (2{,}65)^{\alpha} + \alpha} \times \frac{1}{2B}$$

Avec :
- B Diamètre du clou
- E_m Module pressiométrique
- α Coefficient rhéologique du sol

Où α est caractérisé de la façon suivante :

TYPE	Tourbe α	Argile		Limon		Sable		Grave	
		E_M/Pl	α	E_M/Pl	α	E_M/Pl	α	E_M/Pl	α
Surconsolidé ou très serré	-	>16	1	>14	2/3	>12	1/2	>10	1/3
Normalement consolidé	1	9-16	2/3	8-14	1/2	7-12	1/3	6-10	1/4
Sous-consolidé altéré et remanié ou lâche	-	7-9	1/2	5-8	1/2	5-7	1/3	-	-

Pour la roche, α est défini selon les valeurs suivantes :
- Très peu fracturé : α = 2/3
- Normal : α = 1/2
- Très fracturé : α = 1/3
- Très altéré : α = 2/3

Remarque : Le facteur 2 dans la formule provient de la longue durée des sollicitations (Article 4 du Fascicule 62 – Titre V ou annexe I.1.4 de la norme NF P 94-262).

2) Au sens de la norme NF P 94-282 (inclusions formant un écran continu)

Lorsque les inclusions modélisées forment un écran continu, le module de réaction peut être calculé conformément à l'expression générale donnée dans l'annexe F.3 de la norme NF P 94-282 :

- Dans le cas général :

$$k_h = 2 \frac{\left(\frac{E_M}{\alpha}\right)^{4/3}}{\left(\frac{E_{str} \cdot I_{str}}{B_0}\right)^{1/3}}$$

Avec :

E_M : module pressiométrique
α : coefficient rhéologique, identique au tableau ci-dessus
$E_{str} \cdot I_{str}$: produit d'inertie de l'écran
B0 : longueur de référence, prise égale à 1m
Cette valeur est éventuellement à majorer, en fonction des Notes 1 à 3 de l'annexe F3 de la norme NF P 94-282.

ANNEXE C : COEFFICIENTS DE SECURITE PARTIELS

1) CLOUTERRE 91

ELS :

Aux Etats Limites de Service, tous les coefficients partiels de sécurité sont égaux à 1.

ELU :

Aux Etats Limites Ultimes, les valeurs proposées par CLOUTERRE 91 sont indiquées ci-dessous. Cependant l'utilisateur peut choisir d'autres coefficients.

Actions et résistances		**Combinaison fondamentale**		**Combinaison accidentelle**	
	ouvrage	**Courant**	**Sensible**	**Courant**	**Sensible**
Poids du sol					
* déstabilisateur	gamma	1,05	1,05	1	1
* stabilisateur	gamma	0,95	0,95	1	1
Cohésion effective	cohes	1,5	1,65	1,4	1,5
Cohésion non drainée	cohes	1,3	1,4	1,2	1,3
tan(phi)	tanfi	1,2	1,3	1,1	1,2
frottement latéral sol-clou					
* essai	frlat	1,4	1,5	1,3	1,4
* abaques	frlat	1,8	1,9	1,6	1,7
Pression limite	Plimi	1,9	2	1	1,1
Charge permanente					
* déstabilisatrice	charg	1,2	1,2	1	1
* stabilisatrice	charg	0,9	0,9	1	1
Charge variable	charg	1,33	1,33	1	1
Force permanente					
* déstabilisatrice	force	1,2	1,2	1	1
* stabilisatrice	force	0,9	0,9	1	1
Force variable	force	1,33	1,33	1	1
Limite élastique acier clou	acier	1,15	1,15	1	1
Limite résistance géotextile	armgt				
Limite élastique armature TA	armta				
Coefficient de méthode	metho	1,125	1,125	1	1

2) EUROCODES 7

Les calculs peuvent être effectués selon la norme d'application nationale NF P 94 270 de l'Eurocode 7, les jeux de coefficients partiels correspondants sont donnés dans les tableaux ci-dessous. Les valeurs des facteurs partiels γ sont fonction de l'approche de calcul retenue :

- L'approche de calcul 2 est utilisée pour la vérification des états limites de stabilité externe (GEO) et de stabilité interne (STR). La combinaison à appliquer est :

  A1 + M1 + R2

- L'approche de calcul 3 est utilisée pour la vérification des états limites de stabilité générale (GEO) et de stabilité mixte (GEO et STR). La combinaison de facteurs partiels à appliquer est :

  (A1 ou A2) + M2 + R3

- L'approche de calcul 1 est également incluse dans GEOSTAB. Les combinaisons de facteurs partiels utilisés sont les suivants :
  - Combinaison 1 : A1 + M1 + R1
  - Combinaison 2 : A2 + M2 + R1

- Facteurs partiels pour les actions :

Action		Symbole	A1	A2
Permanente	Défavorable	$\gamma_{G_{sup}}$	1,35	1,0
	Favorable	$\gamma_{G_{inf}}$	1,0	1,0
Variable	Défavorable	$\gamma_{Q_{sup}}$	1,5	1,3
	Favorable	$\gamma_{Q_{inf}}$	0	0

- Facteurs partiels pour les paramètres des sols :

Paramètres du sol	Symbole	M1	M2
Angle de frottement interne	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Cohésion effective	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Cohésion non drainée	γ_{cu}	1,0	1,4
Compression simple	γ_{qu}	1,0	1,4
Poids volumique	γ_{γ}	1,0	1,0
Pression limite sol	γ_{pl}	1,0	1,4

- Facteurs partiels pour les paramètres des éléments de renforcement :

	Propriété	Symbole	M1 [(a)]	M2 [(b)]
Renforcements métalliques	Limite d'élasticité	γ_{M0}	1,0	1,0
	Rupture en traction	γ_{M2}	1,25	1,25
Renforcements géo-synthétiques	Résistance en traction caractéristique	$\gamma_{M,t}$	1,25	1,25
Résistance d'interaction sol-lit de renforcement	μ adhérence [(c)] tiré d'une base de données documentée	$\gamma_{M,f}$	1,35	1,1
	qs [(d)] déduit d'essais d'arrachement	$\gamma_{M,f}$	1,4	1,1

[(a)] Stabilité interne
[(b)] Stabilité mixte
[(c)] Interaction sol-renforcement τ_{max} pour les ouvrages en remblai renforcé
[(d)] Interaction terrain-clou τ_{max} pour les massifs cloués

- Facteurs partiels pour la résistance des parements :

Pour la vérification structurelle (STR) du parement d'un ouvrage en sol renforcé les dispositions de la norme de calcul appropriée au matériau constitutif du parement s'appliquent avec les facteurs partiels recommandés.

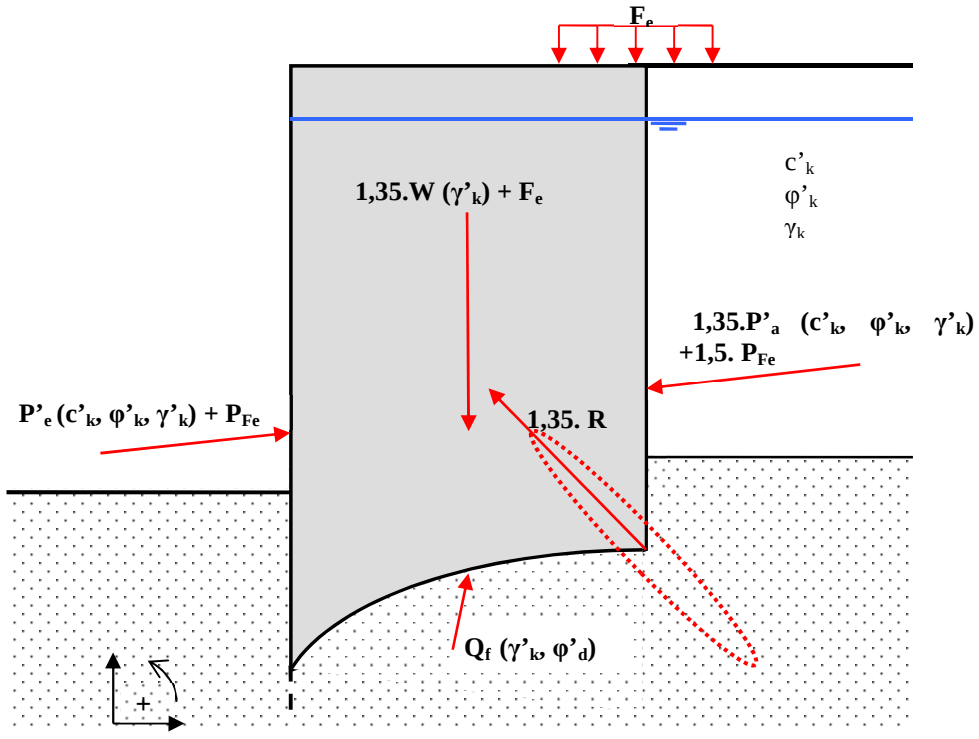
- Facteurs partiels pour les résistances géotechniques
  - pour la vérification de la stabilité externe des ouvrages en sol renforcé :

	Résistance	Symbole	R1	R2
Stabilité externe	Portance	$\gamma_{R,v}$	1,0	1,4
	Résistance au glissement	$\gamma_{R,h}$	1,0	1,1

  - pour la vérification de la stabilité mixte et de la stabilité générale des ouvrages en sol renforcé :

	Résistance	Symbole	R1	R3
Stabilité mixte et générale	Résistance globale au cisaillement sur une surface de rupture	$\gamma_{R,e}$	1,0	1,0

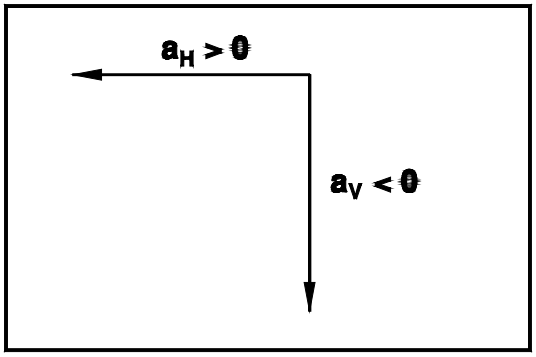
Note :
Coefficients partiels à l'Eurocode 7, Approche 2, pour la méthode de Kranz



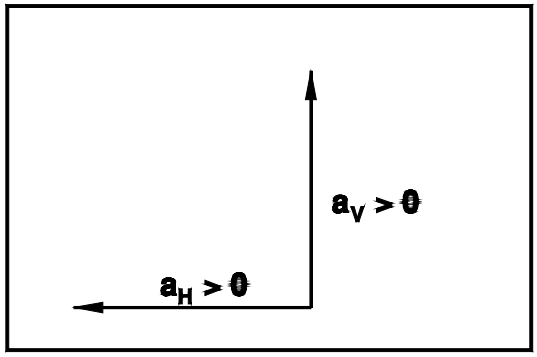
Coefficient de méthode : 1,1

ANNEXE D : ACCELERATIONS SISMIQUES

Le calcul de l'action sismique s'effectue par la méthode statique équivalente. D'après l'AFPS 90, deux combinaisons d'accélération sont à étudier :



COMBINAISON A



COMBINAISON B

Pour connaître la valeur de l'accélération, l'utilisateur peut se référer à l'AFPS 90 ou à la NF P 1998-5 :
§ 9.2 Tome 1 pour les stabilités de pente
§16.4 Tome 2 pour les ouvrages ancrés

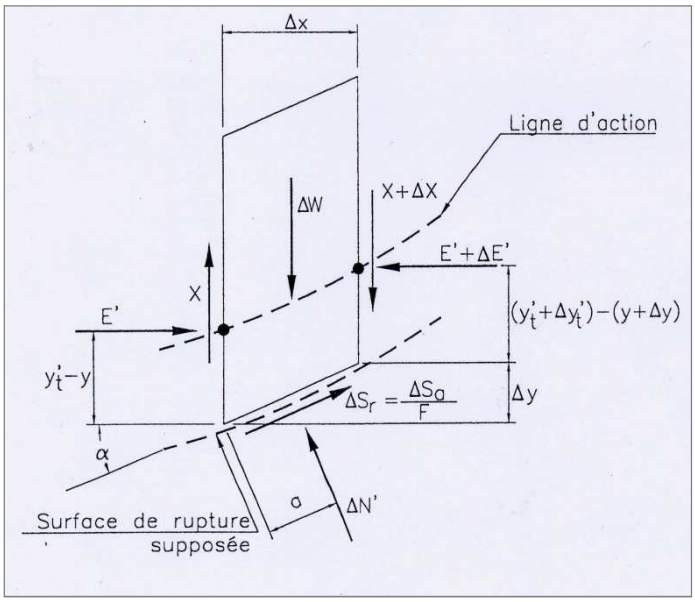
Ou à la NF EN 1998-5 :

§7.3.2.2 : $\sigma_h = \frac{1}{r} a_{gr} \gamma_l \frac{S}{g}$ *et* $\sigma_v = \pm 0{,}5\ \sigma_h$ *(ouvrages de soutènement)*

§4.1.3.3 : $\sigma_h = 0.5 a_{gr} \gamma_l \frac{S}{g}$ *et* $\sigma_v = \pm 0{,}5\ \sigma_h$ *(stabilité des pentes)*

ANNEXE E : DEVELOPPEMENT DE LA METHODE DE CARTER

Les forces appliquées à chaque tranche sont définies sur la Figure suivante :



Equilibre des moments par rapport au point 0 pour l'ensemble des tranches :

$$\sum_{1}^{n}\Big[\ (\Delta N'+\Delta U_{\alpha})\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)$$
$$+\Delta U_{\beta}\left(\bar{x}\cos\beta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\beta\right)$$
$$+\Delta Q\ \left(\bar{x}\cos\delta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\delta\right)$$
$$+\Delta W\ \ \left(1-k_v\right)\bar{x}+k_h\Delta W\left(\bar{y}-heq\right)$$
$$+\Delta S_r\ \ \left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)\Big]=0 \qquad (1)$$

Equilibre des forces verticales pour la tranche :

$$\left(\Delta N'+\Delta U\alpha\right)\cos\alpha+\Delta S_r\sin\alpha+\Delta X-\Delta W\left(1-k_v\right)-\Delta U_{\beta}\cos\beta-\Delta Q\cos\delta=0 \qquad (2)$$

Expression de la force de cisaillement mobilisée à la base de la tranche :

$$\Delta S_r=\frac{\Delta C'_a+\Delta N'\,tg\phi'_a}{F} \qquad (3)$$

Remplacement de ΔS_r dans l'équation (1) par son expression donnée dans l'équation (3) :

$$\sum_{i=1}^{n}\Big[\; F\left(\Delta N'+\Delta U_{\alpha}\right)\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)$$
$$+F\;\Delta U_{\beta}\left(\bar{x}\cos\beta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\beta\right)$$
$$+F\;\Delta Q\;\left(\bar{x}\cos\delta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\delta\right)$$
$$+F\;\Delta W\;\left(1-k_v\right)\bar{x}+F\;k_h\Delta W\left(\bar{y}-heq\right)$$
$$-\left(\Delta C'_a+\Delta N'tg\phi'_a\right)\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)\Big]=0 \qquad (4)$$

Remplacement de ΔS_r dans l'équation (2) par son expression donnée dans l'équation (3) et expression de $\Delta N'$ pour une tranche :

$$F\left(\Delta N'+\Delta U\alpha\right)\cos\alpha+\left(\Delta C'_a+\Delta N'tg\phi'_a\right)\sin\alpha+F\;\Delta X-F\;\Delta W\left(1-k_v\right)$$
$$-F\;\Delta U_{\beta}\cos\beta-F\;\Delta Q\cos\delta=0 \qquad (5)$$

$$\Delta N'\left(F\;\cos\alpha+tg\phi'_a\sin\alpha\right)=-\Delta C'_a\sin\alpha+F\;\left[-\Delta X+\Delta W\left(1-k_v\right)\right.$$
$$\left.+\Delta U_{\beta}\cos\beta+\Delta Q\cos\delta-\Delta U\alpha\cos\alpha\right] \qquad (6)$$

$$\Delta N'=\frac{-\Delta C'_a\sin\alpha+F\left[-\Delta X+\Delta W\left(1-k_v\right)+\Delta U_{\beta}\cos\beta+\Delta Q\cos\delta-\Delta U\alpha\cos\alpha\right]}{F\;\cos\alpha+tg\;\phi'_a\sin\alpha} \qquad (7)$$

Mise en facteur de $\Delta N'$ dans l'équation (4) :

$$\sum_{i=1}^{n}\;\Big\{\Delta N'\Big[F\;\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)-tg\phi'a\left(\bar{x}\sin\alpha-\bar{y}\cos\alpha\right)\Big]$$
$$+F\;\Delta U_{\alpha}\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)\qquad+F\Delta U_{\beta}\left(\bar{x}\cos\beta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\beta\right)$$
$$+F\;\Delta Q\;\left(\bar{x}\cos\delta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\delta\right)$$
$$+F\;\Delta W\;\left(1-kv\right)\bar{x}$$
$$+F\;\Delta W\;k_h\left(\bar{y}-heq\right)$$
$$-\Delta C'_a\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)\Big\}=0 \qquad (8)$$

Remplacement de $\Delta N'$ dans l'équation (8) par son expression dans l'équation (7) :

$$\sum_{i=1}^{n} \left\{ \frac{-\Delta C'_a \sin\alpha + F\left[\Delta W\left(1-kv\right) + \Delta U\beta\cos\beta + \Delta Q\cos\delta - \Delta U\alpha\cos\alpha\right]}{F\cos\alpha + tg\phi'_a \sin\alpha} \right.$$

$$\left[F\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) - tg\phi' a\left(\bar{x}\sin\alpha - \bar{y}\cos\alpha\right)\right]$$

$$+ F\,\Delta U_\alpha\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) \qquad + F\Delta U_\beta\left(\bar{x}\cos\beta - \left(\bar{y} - h\right)\sin\beta\right)$$

$$+ F\,\Delta Q\left(\bar{x}\cos\delta - \left(\bar{y} - h\right)\sin\delta\right)$$

$$+ F\,\Delta W\,\left(1-k_v\right)\bar{x}$$

$$+ F\,\Delta W\,k_h\left(\bar{y} - heq\right)$$

$$\left. -\Delta C'_a\left(\bar{x}\sin\alpha + \bar{y}\cos\alpha\right)\right\} \qquad (9.1)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \left\{ \frac{F\,\Delta X}{F\cos\alpha + tg\phi'_a\sin\alpha} \right. \left[F\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) - tg\phi'_a\left(\bar{x}\sin\alpha - \bar{y}\cos\alpha\right)\right] = \qquad (9.2)$$

$$\frac{F\,\Delta X}{F\cos\alpha + tg\phi'_a\sin\alpha} x \left[F\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) - tg\phi'_a\left(\bar{x}\sin\alpha - \bar{y}\cos\alpha\right)\right] = \qquad (9.2)$$

$$\Delta X \quad \frac{F\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) - tg\phi'_a\left(\bar{x}\sin\alpha - \bar{y}\cos\alpha\right)}{\cos\alpha + \sin\alpha\dfrac{tg\phi'_a}{F}} = \qquad (9.3)$$

$$\Delta X\ \bar{y}\ \frac{F\left(\sin\alpha - \dfrac{\bar{x}}{\bar{y}}\cos\alpha\right) - tg\phi'_a\left(\dfrac{\bar{x}}{\bar{y}}\sin\alpha - \cos\alpha\right)}{\cos\alpha + \sin\alpha\dfrac{tg\phi'_a}{F}} = \qquad (9.4)$$

En divisant en haut et en bas par cosα :

$$\Delta X_{\bar{y}} \frac{F\left(tg\alpha - \frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right) - tg\phi'_a\left(\frac{\bar{x}}{\bar{y}}tg\alpha + 1\right)}{1 + tg\alpha\, tg\frac{\phi'_a}{F}} = \quad (9.5)$$

$$\Delta X_{\bar{y}} \frac{\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\left(-tg\phi'_a\, tg\alpha - F\right) + F\, tg\alpha - tg\phi'_a}{1 + tg\alpha\, tg\frac{\phi'_a}{F}} = \quad (9.6)$$

$$\Delta X_{\bar{y}} \frac{-F\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\left(1 + tg\alpha\, tg\phi'_a / F\right) + F\, tg\alpha - tg\phi'_a}{1 + tg\alpha\, tg\frac{\phi'_a}{F}} = \quad (9.7)$$

$$\Delta X_{\bar{y}} F\left[\frac{tg\alpha\, tg\phi'_a / F}{1 + tg\alpha\, tg\frac{\phi'_a}{F}} - \frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right] = \quad (9.8)$$

Termes en $\Delta C'_a$

$$-\Delta C'a\left\{\frac{\sin\alpha}{F\cos\alpha + tg\phi'_a \sin\alpha}\left[F\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) - tg\phi'_a\left(\bar{x}\sin\alpha + \bar{y}\cos\alpha\right)\right] + \left(\bar{x}\sin\alpha + \bar{y}\cos\alpha\right)\right\} = \quad C-1$$

$$-\Delta C'_a\left\{\frac{1}{\frac{F}{tg\alpha} + tg\phi'a}\left[F\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) - tg\phi'_a\left(\bar{x}\sin\alpha + \bar{y}\cos\alpha\right)\right] + \left(\bar{x}\sin\alpha + \bar{y}\cos\alpha\right)\right\} = \quad C-2$$

$$-\Delta C'_a \frac{tg\alpha}{F + tg\alpha\, tg\phi'a}\left[F\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) - tg\phi'_a\left(\bar{x}\sin\alpha + \bar{y}\cos\alpha\right) + \left(\bar{x}\sin\alpha + \bar{y}\cos\alpha\right)\frac{F + tg\alpha\, tg\phi'a}{tg\alpha}\right] = \quad C-3$$

$$\frac{-\Delta C'_a}{\cos\alpha\,(F+A3)}\left[F\sin\alpha\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)-\sin\alpha\,tg\phi'_a\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)\right.$$

$$\left.+\cos\alpha\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)\left(F+tg\alpha\,tg\phi'_a\right)\right]=$$

$$-\frac{\Delta C'_a}{\cos\alpha\,(F+A3)}\bar{y}\left[F\sin^2\alpha-F\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\sin\alpha\cos\alpha-\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\sin^2\alpha\,tg\phi'_a-\sin\alpha\cos\alpha\,tg\phi'_a\right.$$

$$+\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\sin\alpha\cos\alpha\,F+F\cos^2\alpha+\cos\alpha\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\sin\alpha\,tg\alpha\,tg\phi'_a$$

$$\left.+\cos^2\alpha\;tg\alpha\,tg\phi'_a\right]=$$

$$-\frac{F\,\Delta C'_a}{\cos\alpha\,(F+A3)}\bar{y}$$

Autres termes :

$$F\left[\Delta W\,(1-kv)+\Delta U_\beta\cos\delta+\Delta Q\cos\delta-\Delta U_\alpha\cos\alpha\right]\cos\alpha\left(F+\underbrace{tg\phi'_a\,tg\alpha}_{A3}\right)$$

$$\left[F\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)-tg\phi'_a\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)\right]$$

$$+\;F\;\Delta U_\alpha\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)$$

$$+\;F\;\Delta U_\beta\left(\bar{x}\cos\beta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\beta\right)$$

$$+\;F\;\Delta Q\left(\bar{x}\cos\delta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\delta\right)$$

$$+\;F\;\Delta W\left[\left(1-k_v\right)\bar{x}+k_h\left(\bar{y}-heq\right)\right]=$$

$$\frac{F}{F+A_3}\left\{\frac{1}{\cos\alpha}\left[\Delta W\left(1-k_v\right)+\Delta U_\beta\cos\beta+\Delta Q\cos\delta-\Delta U\alpha\cos\alpha\right]x\right.$$
$$\left[F\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)-tg\phi'_a\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)\right]$$
$$+\ \Delta U\alpha\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)\left(F+tg\phi'a\ tg\alpha\right)$$
$$+\ \Delta U\beta\left(\bar{x}\cos\beta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\beta\right)\left(F+tg\phi'a\ tg\alpha\right)$$
$$+\ \Delta Q\left(\bar{x}\cos\delta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\delta\right)\left(F+tg\phi'a\ tg\alpha\right)$$
$$+\ \Delta W\left(1-k_v\right)\bar{x}+k_h\left(\bar{y}-heq\right)\left(F+tg\phi'a\ tg\alpha\right)\Big\}=$$

$$F/\left(F+A3\right)\ \left[B1+B2\right]$$

Avec :

- B_1 termes en ϕ'_a
- B_2 termes en F

Termes en ϕ'_a

$$B_1=tg\phi'a\left\{-\frac{\Delta W}{\cos\alpha}\left(1-kv\right)\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)\right.$$
$$+\Delta W\ tg\alpha\left[\left(1-kv\right)\bar{x}+k_h\left(\bar{y}-heq\right)\right]$$
$$-\Delta U_\beta\frac{\cos\beta}{\cos\alpha}\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)$$
$$+\Delta U_\beta\ tg\alpha\left(\bar{x}\cos\beta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\beta\right)$$
$$+\Delta U_\alpha\frac{\cos\alpha}{\cos\alpha}\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)$$
$$+\Delta U_\alpha\ tg\alpha\left(\bar{y}\sin\alpha-\bar{x}\cos\alpha\right)$$
$$-\Delta Q\frac{\cos\delta}{\cos\alpha}\left(\bar{x}\sin\alpha+\bar{y}\cos\alpha\right)$$
$$\left.+\Delta Q\ tg\alpha\left(\bar{x}\cos\delta-\left(\bar{y}-h\right)\sin\delta\right)\right\}$$

$$= \bar{y}\, tg\phi' a \left\{ \Delta W \left[-(1-k_v)\left(tg\alpha \frac{\bar{x}}{\bar{y}} + 1 \right) + (1-k_v)\, tg\alpha \frac{\bar{x}}{\bar{y}} + tg\alpha\, k_h \left(1 - \frac{heq}{\bar{y}} \right) \right] \right.$$

$$+ \Delta U_\beta \left[tg\alpha \cos\beta \frac{\bar{x}}{\bar{y}} - tg\alpha \sin\beta \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) - \cos\beta\, tg\alpha \frac{\bar{x}}{\bar{y}} - \cos\beta \right]$$

$$+ \Delta U_\alpha \left[tg\alpha \sin\alpha - \cos\alpha\, tg\alpha \frac{\bar{x}}{\bar{y}} + \sin\alpha \frac{\bar{x}}{\bar{y}} + \cos\alpha \right]$$

$$\left. + \Delta Q \left[tg\alpha \cos\delta \frac{\bar{x}}{\bar{y}} - tg\alpha \sin\delta \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) - \frac{\cos\delta}{\cos\alpha} \sin \frac{\bar{x}}{\bar{y}} - \frac{\cos\delta}{\cos\alpha} \cos\alpha \right] \right\}$$

$$= \bar{y}\, tg\phi' a \left\{ -\Delta W \left[(1-kv) - k_h \left(1 - \frac{heq}{\bar{y}} \right) tg\alpha \right] \right.$$

$$- \Delta U_\beta \left[\cos\beta + tg\alpha \sin\beta \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) \right]$$

$$+ \Delta U_\alpha \left[\frac{\sin^2\alpha}{\cos\alpha} + \cos\alpha \right]$$

$$\left. - \Delta Q \left[\cos\delta + tg\alpha \sin\delta \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) \right] \right.$$

$$= -\bar{y}\, tg\phi' a \left\{ +\Delta W \left[-k_h \left(1 - \frac{heq}{\bar{y}} \right) tg\alpha + (1-kv) \right] \right.$$

$$+ \Delta U\beta \left[\cos\beta + tg\alpha \sin\beta \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) \right]$$

$$- \frac{\Delta U\alpha}{\cos\alpha}$$

$$\left. + \Delta Q \left[\cos\delta + tg\alpha \sin\delta \left(1 - \frac{h}{\bar{y}} \right) \right] \right.$$

$$= -\bar{y}\, tg\phi' a = B_1$$

Termes en F

$$
\begin{aligned}
B_2 = F \Bigg\{ & \frac{\Delta W}{\cos\alpha}(1-kv)\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) \\
& + \Delta W\left[(1-kv)\bar{x} + k_h\left(\bar{y} - heq\right)\right] \\
& + \Delta U_\beta \frac{\cos\beta}{\cos\alpha}\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) \\
& + \Delta U_\beta\left[\bar{x}\cos\beta - \left(\bar{y} - h\right)\sin\beta\right] \\
& + \Delta U_\alpha \frac{\cos\alpha}{\cos\alpha}\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) \\
& + \Delta U_\alpha\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) \\
& + \Delta Q\ \frac{\cos\delta}{\cos\alpha}\left(\bar{y}\sin\alpha - \bar{x}\cos\alpha\right) \\
& + \Delta Q\ \left[\bar{x}\cos\delta - \left(\bar{y} - h\right)\sin\delta\right]\Bigg\}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
= \bar{y}\, F \Bigg\{ & \Delta W\left[(1-k_v)\, tg\alpha - (1-k_v)\frac{\bar{x}}{\bar{y}} + (1-k_v)\frac{\bar{x}}{\bar{y}} + k_h\left(1 - \frac{heq}{\bar{y}}\right)\right] \\
& + \Delta U_\beta\left[\cos\beta\, tg\alpha - \cos\beta\frac{\bar{x}}{\bar{y}} + \cos\beta\frac{\bar{x}}{\bar{y}} - \sin\beta\left(1 - \frac{h}{\bar{y}}\right)\right] \\
& + \Delta Q\left[\cos\delta\, tg\alpha - \cos\delta\frac{\bar{x}}{\bar{y}} + \cos\delta\frac{\bar{x}}{\bar{y}} - \sin\delta\left(1 - \frac{h}{\bar{y}}\right)\right]\Bigg\}
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
= \bar{y}\, F \Bigg\{ & \Delta W\left[(1-k_v)\, tg\alpha + k_h\left(1 - \frac{heq}{\bar{y}}\right)\right] \\
& + \Delta U_\beta\left[\cos\beta\, tg\alpha - \sin\beta\left(1 - \frac{h}{\bar{y}}\right)\right] \\
& + \Delta Q\ \left[\cos\beta\, tg\alpha - \sin\delta\left(1 - \frac{h}{\bar{y}}\right)\right]\Bigg\}
\end{aligned}
$$

$$= \bar{y}\, F\ A2$$

1er membre :

$$\sum_{i=1}^{n} -\frac{F\Delta C'_a}{\cos\alpha\,(F+A_3)}\,\bar{y} + \frac{F}{(F+A_3)}\left[-\bar{y}\,tg\,\phi'_a\,b_1 + \bar{y}\,F\;A_2\right] =$$

$$\sum_{i=1}^{n} -F\,\bar{y}\left[\frac{\overbrace{\frac{\Delta C'a}{\cos\alpha} + tg\,\phi'_a\,b_1}^{A_1} - F\;A_2}{(F+A_3)}\right]$$

Avec $A_3 = tg\alpha\,tg\phi'_a$

2ème membre :

$$\sum_{i=1}^{n} F\,\bar{y}\,\Delta X\left[\underbrace{\frac{tg\alpha - tg\phi'_a/F}{1+tg\alpha\,tg\phi'_a/F}}_{A_4}\,\frac{\bar{x}}{\bar{y}}\right] =$$

$$\sum_{i=1}^{n} \bar{y}\;\left[\frac{A_1 - FA_2}{F+A_3}\right] = \sum_{i=1}^{n} \bar{y}\,\Delta X\;A_4$$

ANNEXE F : DEVELOPPEMENT DE LA METHODE DES PERTURBATIONS

1) Equations générales

a. Equation fondamentale de stabilité

L'introduction du facteur de stabilité calculé par GEOSTAB se fait par la relation :

$$\Gamma \cdot \Gamma_{S3} \cdot \tau = \tau_{max} \quad (1)$$

Avec :

- τ : contrainte tangentielle le long de la surface de rupture (fonction des actions)
- τ_{max} : contrainte tangentielle maximale mobilisable (fonction des paramètres)
- Γ : facteur de stabilité vis-à-vis de la stabilité
- Γ_{S3} : coefficient de méthode

b. Critère de Coulomb

Dans l'équation (1), τ_{max} peut se calculer selon la loi de Coulomb :

$$\tau_{max} = \frac{c'}{\Gamma_c} + \sigma \frac{\tan \varphi'}{\Gamma_\varphi} \quad (2)$$

Avec :

- c' : cohésion du sol au niveau de la surface de rupture
- Γ_c : coefficient partiel de sécurité pris sur la cohésion
- σ : contrainte normale le long de la surface de rupture
- φ' : angle de frottement du sol au niveau de la surface de rupture
- Γ_φ : coefficient partiel de sécurité pris sur l'angle de frottement

c. Equations d'équilibre d'une tranche d'épaisseur dx (cf. figure 3 des considérations théoriques)

En discrétisant le volume de sol, au dessus de la surface calculée, en tranches d'épaisseur dx, il vient, à partir du bilan des forces du paragraphe 2.2 :

- Suivant l'horizontale :

$$-dU - dE' + \tau \cdot dS \cdot \cos a - \sigma \cdot dS \cdot \sin a = 0 \qquad (3a)$$

- Suivant la verticale :

$$-dT - \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + \tau \cdot dS \cdot \sin a + \sigma \cdot dS \cdot \cos a = 0 \qquad (3b)$$

Avec $dS = \frac{dx}{\cos a}$ (tranches de largeur 1 m), il vient :

$$-dU - dE' + \tau \cdot dx - \sigma \cdot dx \cdot \tan a = 0 \qquad (4a)$$

$$-dT - \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + \tau \cdot dx \cdot \tan a + \sigma \cdot dx = 0 \qquad (4b)$$

Où :

- dU est la poussée horizontale due à l'eau
- dE' est la composante horizontale des forces effectives intertranches
- dT est la composante verticale des forces intertranches
- α est l'angle entre la base de la tranche et l'horizontale
- dS est la surface de la base de la tranche, d'épaisseur 1 m, de hauteur h et de largeur 1
- γ·h·dx est le poids total de la tranche de sol
- Γ_γ est le coefficient de sécurité partiel pris pour le poids des sols

d. Ecriture des moments au point O de l'ensemble du glissement potentiel

Pour l'ensemble des tranches dont les efforts dont modélisés au paragraphe 3.3, l'équation des moments peut s'écrire :

$$\int_{x_0}^{x_1}\left[y \cdot \left(\tau - \sigma \cdot \tan a\right) + x \cdot \left(\Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h - \tau \cdot \tan a - \sigma\right)\right] \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1}\left(-y \cdot dU - y \cdot dE' + x \cdot dT\right) + M_{add} = 0 \qquad (5)$$

Avec :

- M_{add} : l'ensemble des moments extérieurs au volume considéré
- x : l'abscisse du milieu de la base d'une tranche
- y : l'ordonnée du milieu de la base d'une tranche

e. Relevé des inconnues et conclusions

Le tableau suivant montre, pour chaque équation, les paramètres connus et inconnus :

	Paramètres connus	Remarques	Paramètres inconnus	Remarques
(1)	Γ_{S3}	défini par l'utilisateur (normes, …)	Γ	
			τ	
			τ_{max}	
(2)	c'	défini par l'utilisateur	τ_{max}	
	Γ_c	défini par l'utilisateur		
	φ'	défini par l'utilisateur	σ	
	Γ_φ	défini par l'utilisateur		
(4a)	dU	défini par la différence de hauteur d'eau entre 2 tranches	dE'	
	α		τ	
			σ	
(4b)	Γ_γ	défini par l'utilisateur	dT	
	γ	défini par l'utilisateur	τ	
	h		σ	
	α			
(5)	x_0 ; x_1	intersection surface calculée / TN	τ	
	x ; y	point milieu de la base de la tranche		
	α		σ	
	Γ_γ			
	γ		dT	∫dT correspond à la somme des composantes verticales des surcharges dans le volume considéré
	h			
	dU		dE'	∫dE' correspond à la somme des composantes horizontales des surcharges dans le volume considéré
	M_{add}			

On a donc 5 équations, pour 6 inconnues (dE', dT, τ, σ, τ_{max} et Γ). Le système est hyperstatique, et il faut une hypothèse supplémentaire pour pouvoir le résoudre.

2) Hypothèse de Fellenius

a. Introduction

La substitution du paramètre τ dans les équations (4a) et (4b) est possible. On obtient alors, d'après (4a) :

$$\tau \cdot dx = dU + dE' + \sigma \cdot \tan a \cdot dx \tag{6}$$

Soit, dans (4b) :

$$-dT - \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + \left(dU + dE' + \sigma \cdot \tan a \cdot dx\right) \cdot \tan a + \sigma \cdot dx = 0$$

En développant,

$$-dT - \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + dU \cdot \tan a + dE' \cdot \tan a + \sigma \cdot \left(\tan a\right)^2 \cdot dx + \sigma \cdot dx = 0 \tag{7}$$

En isolant σ dans (7), il vient :

$$\sigma = \frac{\frac{dT}{dx} - \frac{dE'}{dx} \cdot \tan a + \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h - \frac{dU}{dx} \cdot \tan a}{\left(1 + \left(\tan a\right)^2\right)} \tag{8}$$

b. Hypothèse de Fellenius

La méthode de Fellenius impose :

$$dT = dE' \cdot \tan a \,. \tag{9}$$

L'équation (8) devient alors :

$$\sigma_{Fel} = \frac{\Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h - \frac{dU}{dx} \cdot \tan a}{\left(1 + \left(\tan a\right)^2\right)} \tag{10}$$

En outre, les équations trigonométriques donnent :

$$\frac{1}{\left(1 + \left(\tan a\right)^2\right)} = \frac{1}{\left(\cos a\right)^2 + \left(\sin a\right)^2 + \frac{\left(\sin a\right)^2}{\left(\cos a\right)^2}} = \frac{\left(\cos a\right)^2}{\left(\cos a\right)^4 + \left(\sin a\right)^2 \cdot \left(\cos a\right)^2 + \left(\sin a\right)^2}$$

Avec :

$$(\cos a)^4 + (\sin a)^2 \cdot (\cos a)^2 + (\sin a)^2 = (\cos a)^4 + \left(1 - (\cos a)^2\right) \cdot (\cos a)^2 + (\sin a)^2$$
$$= (\cos a)^4 + (\cos a)^2 - (\cos a)^4 + (\sin a)^2 = (\cos a)^2 + (\sin a)^2 = 1$$

Ce qui donne $$\sigma_{Fel} = \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot (\cos a)^2 - \frac{dU}{dx} \cdot \tan a \cdot (\cos a)^2$$

Soit

$$\sigma_{Fel} = \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot (\cos a)^2 - \frac{dU}{dx} \cdot \sin a \cdot \cos a \qquad (11)$$

L'introduction de l'hypothèse donnée en (9) ajoute une équation, ce qui rend le système isostatique, donc calculable.

Cependant, l'expérience a montré que le facteur de sécurité Γ_{Fel} calculé avec cette hypothèse complémentaire était 20 à 40 % plus optimiste que le calcul par d'autres méthodes, de type Bihsop, par exemple.

c. Hypothèse de Faure

Il existe certains cas où la contrainte de Fellenius est assez éloignée de l'état réel des contraintes dans le sol. Faure à resstimé la contrainte dans le sol à partir des cercles de Mohr, et en intégrant les efforts extérieurs appliqués sur la tranche. Après recherches, il est apparu que le choix optimal pour σ_0 et ν était :

$$\sigma_0 = \frac{\left(\frac{\Delta W + F_v}{dx}\right) + c.\cot\varphi}{1 + \sin\varphi\,.\cos\left(2a - \varphi - \frac{\pi}{2}\right)} \cdot cos^2\varphi - c \cdot cot\varphi - \frac{(dU + F_h)}{dx}$$

$$\nu = \tan\alpha$$

L'expression de σ_0 provient du calcul trigonométrique dans le cercle de Mohr, en supposant que la contrainte n'est pas une contrainte principale.
La prise en compte d'une contrainte initiale de cette forme permet :
- d'affiner la contrainte calculée initialement, puisqu'elle représente l'état réel de contraintes dans le sol ;
- de mieux prendre en compte l'augmentation de la contrainte dans le sol dû aux efforts extérieurs verticaux (F_v) comme horizontaux (F_h) (surcharges, ancrages, ...).

3) Théorie de la méthode des perturbations

a. Introduction

L'objectif de la méthode des perturbations est « d'améliorer » la contrainte de Fellenius calculée en (11), en y ajoutant un facteur de perturbation, fonction de α :

$$\sigma_{pert} = \sigma_{Fel} \cdot \left(\lambda + \mu \cdot (\tan a)^n\right) \qquad (12)$$

Avec :

σ_{pert} : contrainte de perturbation
σ_{Fel} : contrainte de Fellenius, calculée en (11)

n : 1 ou 2
λ, μ : inconnus du système (paramètres sans dimension)

L'équation fondamentale de la stabilité (1), associée à la loi de Coulomb (2) donne une équation liant τ et σ au facteur de sécurité Γ, en éliminant τ_{max} :

$$\tau = \frac{\tau_{\max}}{\Gamma \cdot \Gamma_{S3}} = \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma \cdot \tan\varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \qquad (13)$$

Avec σ donné en (12).

b. Mise à jour des équations avec les hypothèses données

En développant les équations (4a), (4b) et (5) avec les hypothèses de la méthode des perturbations, il vient :

- Pour l'équation (4a) :

$$-dU - dE' + \left(\frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma_{Fel} \cdot \left(\lambda + \mu \cdot (\tan a)^n\right) \cdot \tan\varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx - \sigma_{Fel} \cdot \left(\lambda + \mu \cdot (\tan a)^n\right) \cdot dx \cdot \tan a = 0$$

(14a)

En intégrant (14a), il vient alors :

$$U_0 - U_1 + E'_0 - E'_1 + \int_{x_0}^{x_1} \left(\frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma_{Fel} \cdot \left(\lambda + \mu \cdot (\tan a)^n\right) \cdot \tan\varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left(\left(\lambda + \mu \cdot (\tan a)^n\right) \cdot \tan a \right) \cdot dx = 0$$

(14b)

Intégrer l'équation (4) (afin d'éliminer l'inconnue dE') n'était pas utile, puisqu'elle faisait intervenir une contrainte normale inconnue.

Les inconnues de l'équation (14b) sont : Γ, λ et μ

- Pour l'équation (4b) :

$$-dT - \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + \left(\frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma_{Fel} \cdot \left(\lambda + \mu \cdot (\tan a)^n\right) \cdot \tan\varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot \tan a \cdot dx + \sigma_{Fel} \cdot \left(\lambda + \mu \cdot (\tan a)^n\right) \cdot dx = 0$$

(15a)

En intégrant (15a) :

$$T_0 - T_1 - \int_{x_0}^{x_1} \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} \left(\frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + \frac{\sigma_{Fel} \cdot \left(\lambda + \mu \cdot (\tan a)^n\right) \cdot \tan\varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot \tan a \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left(\lambda + \mu \cdot (\tan a)^n\right) \cdot dx = 0$$

(15b)

Les inconnues de l'équation (15b) sont : Γ, λ et μ

- Pour l'équation (5) :

$$\int_{x_0}^{x_1}\left[\begin{array}{l} y\cdot\left(\left(\dfrac{c'}{\Gamma_c\cdot\Gamma\cdot\Gamma_{S3}}+\dfrac{\sigma_{Fel}\cdot\left(\lambda+\mu\cdot(\tan a)^n\right)\cdot\tan\varphi}{\Gamma_\varphi\cdot\Gamma\cdot\Gamma_{S3}}\right)-\sigma_{Fel}\cdot\left(\lambda+\mu\cdot(\tan a)^n\right)\cdot\tan a\right)+ \\ x\cdot\left(\Gamma_\gamma\cdot\gamma\cdot h-\left(\dfrac{c'}{\Gamma_c\cdot\Gamma\cdot\Gamma_{S3}}+\dfrac{\sigma_{Fel}\cdot\left(\lambda+\mu\cdot(\tan a)^n\right)\cdot\tan\varphi}{\Gamma_\varphi\cdot\Gamma\cdot\Gamma_{S3}}\right)\cdot\tan a-\sigma_{Fel}\cdot\left(\lambda+\mu\cdot(\tan a)^n\right)\right)\end{array}\right]\cdot dx\ +$$

$$\int_{x_0}^{x_1}\left(-y\cdot dU-y\cdot dE'+x\cdot dT\right)+M_{add}=0$$

(16)

Les inconnues de l'équation (16) sont : Γ, λ et μ

Les 3 équations (14b), (15b) et (16) ont 3 inconnues : le système est isostatique et est donc calculable !

De plus, il est possible d'écrire les 3 équations linéairement par rapport à λ et μ :

c. Equations de la méthode des perturbations : système matriciel

- Equation des forces horizontales

(14b) devient alors :

$$\lambda\cdot\left[\int_{x_0}^{x_1}\sigma_{Fel}\cdot\left(\frac{\tan\varphi}{\Gamma_\varphi\cdot\Gamma\cdot\Gamma_{S3}}-\tan a\right)\cdot dx\right]+\mu\cdot\left[\int_{x_0}^{x_1}\sigma_{Fel}\cdot(\tan a)^n\cdot\left(\frac{\tan\varphi}{\Gamma_\varphi\cdot\Gamma\cdot\Gamma_{S3}}-\tan a\right)\cdot dx\right]+$$

$$U_0-U_1+E'_0-E'_1+\int_{x_0}^{x_1}\frac{c'}{\Gamma_c\cdot\Gamma\cdot\Gamma_{S3}}\cdot dx\quad=0$$

(17)

(17) est de la forme :

$$\lambda\cdot A+\mu\cdot B+C=0 \qquad (18a)$$

Avec :

$$A=\int_{x_0}^{x_1}\sigma_{Fel}\cdot\frac{\tan\varphi}{\Gamma_\varphi\cdot\Gamma\cdot\Gamma_{S3}}\cdot dx-\int_{x_0}^{x_1}\sigma_{Fel}\cdot\tan a\cdot dx \qquad (18b)$$

$$B=\int_{x_0}^{x_1}\sigma_{Fel}\cdot(\tan a)^n\cdot\frac{\tan\varphi}{\Gamma_\varphi\cdot\Gamma\cdot\Gamma_{S3}}\cdot dx-\int_{x_0}^{x_1}\sigma_{Fel}\cdot(\tan a)^{n+1}\cdot dx \qquad (18c)$$

$$C=\int_{x_0}^{x_1}\frac{c'}{\Gamma_c\cdot\Gamma\cdot\Gamma_{S3}}\cdot dx+U_0-U_1+E'_0-E'_1 \qquad (18d)$$

Chacun des termes A, B et C contiennent un terme en $\frac{1}{\Gamma}$ et un terme connu.

(18b) devient :

$$A = H_1 + \frac{H_2}{\Gamma} \tag{18e}$$

Avec :

$$H_1 = -\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \tan a \cdot dx \tag{18f}$$

$$H_2 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \tag{18g}$$

H_1 et H_2 sont alors entièrement calculables.

De la même manière, (18c) devient :

$$B = H_3 + \frac{H_4}{\Gamma} \tag{18h}$$

Avec :

$$H_3 = -\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan a)^{n+1} \cdot dx \tag{18i}$$

$$H_4 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan a)^n \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \tag{18j}$$

Et (18d) est de la forme :

$$C = H_5 + \frac{H_6}{\Gamma} \tag{18k}$$

Avec :

$$H_5 = U_0 - U_1 + E'_0 - E'_1 \tag{18l}$$

$$H_6 = \int_{x_0}^{x_1} \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \tag{18m}$$

Remarque : dans le cas de surfaces planes, les paramètres H_i sont proportionnellement reliés entre eux (puisque dans ce cas, α est constant). Le système n'admet alors pas de solution, ce qui constitue une limite à la méthode des perturbations.

- Equation des forces verticales

λ et μ sont isolés dans (15b) :

$$\lambda \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left(1 + \frac{\tan \varphi \cdot \tan a}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx \right] + \mu \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan a)^n \cdot \left(1 + \frac{\tan \varphi \cdot \tan a}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx \right]$$
$$+ \int_{x_0}^{x_1} \frac{c' \cdot \tan a}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + T_0 - T_1 = 0$$

(19)

(19) est de la forme :

$$\lambda \cdot D + \mu \cdot E + F = 0 \tag{20a}$$

Avec :

$$D = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left(\frac{\tan\varphi \cdot \tan a}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx \tag{20b}$$

$$E = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan a)^n \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan a)^{n+1} \cdot \left(\frac{\tan\varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \right) \cdot dx \tag{20c}$$

$$F = \int_{x_0}^{x_1} \frac{c' \cdot \tan a}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx + T_0 - T_1 - \int_{x_0}^{x_1} \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx \tag{20d}$$

$$D = V_1 + \frac{V_2}{\Gamma} \tag{20e}$$

Avec :

$$V_1 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot dx \tag{20f}$$

$$V_2 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan\varphi \cdot \tan a}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \tag{20g}$$

$$E = V_3 + \frac{V_4}{\Gamma} \tag{20h}$$

Avec :

$$V_3 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan a)^n \cdot dx \tag{20i}$$

$$V_4 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan a)^{n+1} \cdot \frac{\tan\varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \tag{20j}$$

$$F = V_5 + \frac{V_6}{\Gamma} \tag{20k}$$

Avec :

$$V_5 = T_0 - T_1 - \int_{x_0}^{x_1} \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx \tag{20l}$$

$$V_6 = \int_{x_0}^{x_1} \frac{c' \cdot \tan a}{\Gamma_c \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx \tag{20m}$$

- Equation des moments

λ et μ sont isolés dans (16) :

$$\lambda \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left[y \cdot \left(\frac{\tan\varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} - \tan a \right) - x \cdot \left(\frac{\tan\varphi \cdot \tan a}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + 1 \right) \right] \cdot dx \right]$$
$$+ \mu \cdot \left[\int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \left[y \cdot \left(\frac{\tan\varphi \cdot (\tan a)^n}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} - (\tan a)^{n+1} \right) - x \cdot \left(\frac{\tan\varphi \cdot (\tan a)^{n+1}}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} + (\tan a)^n \right) \right] \cdot dx \right]$$
$$+ \int_{x_0}^{x_1} y \cdot \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} x \cdot \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot \tan a \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} x \cdot \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx$$
$$+ \int_{x_0}^{x_1} - y \cdot dU - y \cdot dE' + x \cdot dT + M_{add} = 0 \qquad (21)$$

(21) est de la forme :

$$\lambda \cdot G + \mu \cdot H + I = 0 \qquad (22a)$$

Avec :

$$G = \int_{x_0}^{x_1} - \sigma_{Fel} \cdot (y \cdot \tan a + x) \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan\varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot (y - x \cdot \tan a) \cdot dx \qquad (22b)$$

$$H = \int_{x_0}^{x_1} - \sigma_{Fel} \cdot (\tan a)^n \cdot (y \cdot \tan a + x) \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan\varphi \cdot (\tan a)^n}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot (y - x \cdot \tan a) \cdot dx \qquad (22c)$$

$$I = \int_{x_0}^{x_1} y \cdot \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot dx - \int_{x_0}^{x_1} x \cdot \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma \cdot \Gamma_{S3}} \cdot \tan a \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} x \cdot \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx$$
$$+ \int_{x_0}^{x_1} - y \cdot dU - y \cdot dE' + x \cdot dT + M_{add} \qquad (22d)$$

$$G = O_1 + \frac{O_2}{\Gamma} \qquad (22e)$$

Avec :

$$O_1 = \int_{x_0}^{x_1} - \sigma_{Fel} \cdot (y \cdot \tan a + x) \cdot dx \qquad (20f)$$

$$O_2 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot \frac{\tan\varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot (y - x \cdot \tan a) \cdot dx \qquad (22g)$$

$$H = O_3 + \frac{O_4}{\Gamma} \qquad (22h)$$

Avec :

$$O_3 = \int_{x_0}^{x_1} -\sigma_{Fel} \cdot (\tan a)^n \cdot (y \cdot \tan a + x) \cdot dx \tag{22i}$$

$$O_4 = \int_{x_0}^{x_1} \sigma_{Fel} \cdot (\tan a)^n \cdot \frac{\tan \varphi}{\Gamma_\varphi \cdot \Gamma_{S3}} \cdot (y - x \cdot \tan a) \cdot dx \tag{22j}$$

$$I = O_5 + \frac{O_6}{\Gamma} \tag{22k}$$

Avec :

$$O_5 = \int_{x_0}^{x_1} x \cdot \Gamma_\gamma \cdot \gamma \cdot h \cdot dx + \int_{x_0}^{x_1} -y \cdot dU - y \cdot dE' + x \cdot dT + M_{add} \tag{22l}$$

$$O_6 = \int_{x_0}^{x_1} \frac{c'}{\Gamma_c \cdot \Gamma_{S3}} \cdot (y - x \cdot \tan a) \cdot dx \tag{22m}$$

Etant donnée la présence du terme tanα dans les équations, il faut poser une limitation dans le cas où $\alpha \rightarrow \pm(\pi/2)$. On va considérer que si $|\alpha| = (\pi/2) \pm 10^{-5}$ rad, alors $\sigma_{pert} = 0$ dans (12).

- Ecriture matricielle

Les équations (14b), (15b) et (16), du fait de la linéarité du système sur λ et μ, peuvent s'écrire sous la forme d'une équation matricielle. On a :

$$\begin{pmatrix} A & B & C \\ D & E & F \\ G & H & I \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{23a}$$

Avec les variables A, B, C, D, E, F, G, H et I définies dans les équations (18e) à (22k), soit :

$$\begin{pmatrix} H_1 + \frac{H_2}{\Gamma} & H_3 + \frac{H_4}{\Gamma} & H_5 + \frac{H_6}{\Gamma} \\ V_1 + \frac{V_2}{\Gamma} & V_3 + \frac{V_4}{\Gamma} & V_5 + \frac{V_6}{\Gamma} \\ O_1 + \frac{O_2}{\Gamma} & O_3 + \frac{O_4}{\Gamma} & O_5 + \frac{O_6}{\Gamma} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \lambda \\ \mu \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \tag{23b}$$

Avec H_1, …, O_6 directement calculables. Ce système, de la forme $A \cdot x = 0$, est un système d'équations linéaires homogènes.

d. Résolution du système d'équations

- Ecriture de l'équation du facteur de sécurité

La solution triviale du système (23b) est : $\lambda = \mu = 0$, ce qui ramène à la solution de Fellenius. Les solutions sont dites non triviales si le déterminant de A est nul, soit :

$$\det\begin{pmatrix} H_1+\frac{H_2}{\Gamma} & H_3+\frac{H_4}{\Gamma} & H_5+\frac{H_6}{\Gamma} \\ V_1+\frac{V_2}{\Gamma} & V_3+\frac{V_4}{\Gamma} & V_5+\frac{V_6}{\Gamma} \\ O_1+\frac{O_2}{\Gamma} & O_3+\frac{O_4}{\Gamma} & O_5+\frac{O_6}{\Gamma} \end{pmatrix}=0 \qquad (24)$$

Par un changement de variable de la forme $\Gamma'=\frac{1}{\Gamma}$, et en développant le calcul du déterminant, il vient une équation de la forme :

$$a_0\cdot\Gamma'^3+a_1\cdot\Gamma'^2+a_2\cdot\Gamma'+a_3=0 \qquad (25)$$

Avec :

$$a_0=V_6\cdot(-H_2\cdot O_4+H_4\cdot O_2)+V_4\cdot(H_2\cdot O_6-H_6\cdot O_2)+V_2\cdot(-H_4\cdot O_6+H_6\cdot O_4) \qquad (25a)$$

$$\begin{aligned} a_1=&V_6\cdot(-H_1\cdot O_4-H_2\cdot O_3+H_3\cdot O_2+H_4\cdot O_1)+V_5\cdot(-H_2\cdot O_4+H_4\cdot O_2)+\\ &V_4\cdot(H_1\cdot O_6+H_2\cdot O_5-H_5\cdot O_2-H_6\cdot O_1)+V_3\cdot(H_2\cdot O_6-H_6\cdot O_2)+\\ &V_2\cdot(-H_3\cdot O_6-H_4\cdot O_5+H_5\cdot O_4+H_6\cdot O_3)+V_1\cdot(H_6\cdot O_4-H_4\cdot O_6) \end{aligned} \qquad (25b)$$

$$\begin{aligned} a_2=&V_6\cdot(-H_1\cdot O_3+H_3\cdot O_1)+V_5\cdot(-H_1\cdot O_4-H_2\cdot O_3+H_3\cdot O_2+H_4\cdot O_1)+\\ &V_4\cdot(H_1\cdot O_5-H_5\cdot O_1)+V_3\cdot(H_1\cdot O_6+H_2\cdot O_5-H_6\cdot O_1-H_5\cdot O_2)+\\ &V_2\cdot(-H_3\cdot O_5+H_5\cdot O_3)+V_1\cdot(-H_3\cdot O_6-H_4\cdot O_5+H_5\cdot O_4+H_6\cdot O_3) \end{aligned} \qquad (25c)$$

$$a_3=V_5\cdot(-H_1\cdot O_3+H_3\cdot O_1)+V_3\cdot(H_1\cdot O_5-H_5\cdot O_1)+V_1\cdot(-H_3\cdot O_5+H_5\cdot O_3) \qquad (25d)$$

La méthode de Cardan est alors utilisée pour déterminer les racines de l'équation (25).

- Résolution de l'équation du troisième degré en Γ'

L'équation de base est l'équation (25) : $a_0 \cdot \Gamma'^3 + a_1 \cdot \Gamma'^2 + a_2 \cdot \Gamma' + a_3 = 0$

Si $a_0 \neq 0$, alors l'équation (25) peut être divisée par a_0, et le changement de variable $X = \Gamma' + \frac{a_1}{3 \cdot a_0}$ peut être effectué. On obtient une équation de la forme :

$$X^3 + p \cdot X + q = 0 \tag{26}$$

Avec :

$$p = \frac{a_3}{a_0} - \frac{a_1^2}{3 \cdot a_0^2} \tag{26a}$$

$$q = \frac{2 \cdot a_1^3}{27 \cdot a_0^3} - \frac{a_1 \cdot a_2}{3 \cdot a_0^2} + \frac{a_3}{a_0} \tag{26b}$$

La méthode de Cardan consiste à calculer le discriminant Δ de (26) et à étudier son signe :

$$\Delta = \frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} \tag{26c}$$

- si Δ > 0, alors il existe une solution réelle X calculée par la formule :

$$X = \left(-\frac{q}{2} + \left(\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} + \left(-\frac{q}{2} - \left(\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{27}$$

- si Δ = 0, alors il existe deux solutions réelles X_1 et X_2 calculées par les formules :

$$X_1 = \frac{3 \cdot q}{p} \tag{28a}$$

$$X_2 = \frac{-3 \cdot q}{2 \cdot p} \tag{28b}$$

- Si Δ < 0, alors il existe 3 solutions réelles X_i, avec i variant de 0 à 2 :

$$X_i = 2 \cdot \sqrt{\frac{-p}{3}} \cdot \cos\left(\frac{1}{3} \cdot \arccos\left(\frac{-q}{2} \cdot \sqrt{\frac{27}{-p^3}} \right) + \frac{2 \cdot i \cdot \pi}{3} \right) \tag{29}$$

Il faut alors refaire le changement de variable $\Gamma' = X - \frac{a_1}{3 \cdot a_0}$ et $\Gamma = \frac{1}{\Gamma'}$, afin de déterminer la valeur de Γ_{pert} la plus petite, qui sera la valeur du facteur de sécurité retenue pour la méthode des perturbations.

Dans le cas où $a_0 = 0$, l'équation à résoudre est du second degré, mais le raisonnement sur Γ' reste identique. Si l'équation est du premier degré, alors la solution est triviale.